Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Ajuste de parâmetros para modelos típicos de sistemas de excitação, recorrendo à resposta em frequência do modelo

Victor Emanuel Lima Marques

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. Helena Osório Pestana de Vasconcelos

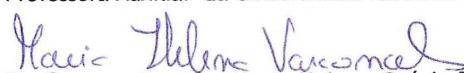
27-06-2011

MIEEC - MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES | 2010/2011

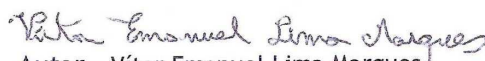
A Dissertação intitulada

"Ajuste de Parâmetros para Modelos Típicos de Sistemas de Excitação, Recorrendo à Resposta em Frequência do Modelo"

foi aprovada em provas realizadas em 19-07-2011

o júri

João Paulo Tomé Saraiva

Presidente Professor Doutor João Paulo Tomé Saraiva
Professor Associado do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fernanda de Oliveira Resende

Professora Doutora Fernanda de Oliveira Resende
Professora Auxiliar da Universidade Losófona

Maria Helena Vasconcelos

Professora Doutora Maria Helena Osório Pestana de Vasconcelos
Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extractos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.

Vítor Emanuel Lima Marques

Autor - Vítor Emanuel Lima Marques

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Este trabalho tem como objectivo resolver um problema usual que ocorre durante a realização de uma simulação dinâmica de um sistema eléctrico real: conseguir obter o valor dos parâmetros para um modelo estandardizado do sistema de excitação de uma máquina síncrona quando o modelo fornecido pelos fabricantes não corresponde a nenhum dos modelos típicos.

Desta forma, foi desenvolvida a aplicação "DC1Atuning" que, através do ajuste do valor dos parâmetros do modelo típico "DC1A", minimiza as diferenças da resposta em frequência fornecidas pelos dois modelos (o fornecido pelos fabricantes e o típico ajustado), recorrendo à minimização do erro absoluto relativo e do erro quadrático médio relativo.

A qualidade dos resultados obtidos é demonstrada recorrendo à comparação da resposta temporal fornecida pelo modelo dinâmico de cada um dos sistemas de excitação, a um aumento em degrau na tensão de referência do sistema de excitação, utilizando o software PSIM da empresa "Powersim" ou a plataforma de simulação SIMULINK disponível no MATLAB.

Abstract

The aim of this work is to solve a usual problem that occurs during the execution of a dynamic simulation of a real electric system: manage to adjust the parameters values of a standardized excitation system model of a synchronous machine when the manufacture supplied a model that does not match with any of the typical models.

Thus, it was developed the “DC1Atunig” application, an application that through the “DC1A” model parameter value adjustment, minimizes the difference of the frequency response of both model (model supplied by the manufacture and the typical model).

The quality of the achieved results is showed by comparing the time domain response of both the excitation systems dynamic model, at a step rise on the reference voltage of the excitation system, by using the PSIM software from the “Powersim” company and/or by using the “SIMULINK” platform available on the MATLAB.

Agradecimentos

Quero agradecer à Professora Doutora Helena Osório Pestana de Vasconcelos, que me orientou neste trabalho, e que pela sua qualidade como docente e pessoa, me permitiu aplicar, rectificar e expandir os meus conhecimentos, para que eu pudesse atingir um desempenho máximo.

Gostaria, igualmente, de deixar uma palavra de apreço à minha esposa e restante família que me apoiou, dando-me as condições e os incentivos necessários para que este projecto fosse concretizado.

Índice

Lista de figuras

Lista de tabelas

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

AVR	Regulador automático de tensão (denominado, Automatic Voltage Regulator, na literatura anglo-saxónica)
DC1Atuning	Emulador da resposta em frequência de sistema de excitação por ajuste dos parâmetros do modelo típico de sistema de excitação “DC1A”
IEEE	Instituto de Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos
SI	Aplicação “System identification” do Matlab

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Contexto e justificação do trabalho

Este trabalho foi realizado no âmbito da unidade curricular “Dissertação” do Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O tema deste trabalho advém da necessidade de existência de uma solução computacional que permita ajustar os parâmetros de um modelo típico de sistema de excitação de forma a igualar a resposta em frequência à de um outro qualquer sistema de excitação.

Na indústria existe uma grande variedade de fabricantes de sistemas de excitação para geradores síncronos que, por motivos diversos, usam modelos de excitação que não correspondem aos tipificados pelo IEEE.

Assim, quando se pretende, por exemplo, realizar estudos de estabilidade de rede, é necessário muitas vezes modelizar os sistemas de excitação em função dos modelos disponíveis na aplicação informática. No entanto, pode acontecer que a aplicação informática não disponibilize o modelo de sistema de excitação em causa por este se encontrar obsoleto ou por, simplesmente, não corresponder a nenhum modelo estandardizado.

Desta forma, poderá ser necessário ajustar a reposta em frequência de um modelo estandardizado de forma a traduzir, da melhor forma possível, a resposta do modelo em questão.

Tendo em conta o exposto, este estudo pretende aferir se existe um método matemático ou uma aplicação informática que permita atingir o objectivo atrás descrito e, caso tal não se verifique, desenvolver uma metodologia de ajuste dos parâmetros de um modelo típico, para que seja criada uma aplicação que cumpra a referida função, minimizando a diferença da resposta em frequência dos dois modelos.

Não obstante de ser expectável que a indústria faça uma procura incessante de uma aplicação deste tipo, nos capítulos seguintes, por motivos que não foi possível identificar, verifica-se que existem poucos ou nenhuns trabalhos específicos nesta área.

No entanto, a necessidade actual e premente de obter a maior eficiência energética possível devido à evolução do mercado da energia, à produção descentralizada e cada vez maior inter-conectividade de toda a rede eléctrica, levam-nos a pôr em causa os pressupostos que no passado eram tidos como certos e que actualmente necessitam ser reavaliados, para que, em tempo real, se possa gerir uma rede eléctrica que garanta os índices de qualidade exigíveis no presente e no futuro.

Daí que haja a necessidade de, com o maior detalhe possível, prever o comportamento dinâmico de um dado sistema de excitação. Este trabalho surge, então, da necessidade de fazer uma simulação dinâmica de um sistema eléctrico real, de forma detalhada e minuciosa, que considere uma caracterização adequada de um dado sistema de excitação, para que ocorra uma redução significativa das incertezas de simulação, especialmente durante regimes transitórios originados por perturbações que causam variações de tensão, como, por exemplo, variações de carga eléctrica de rede, manobras, ligação/desligação de centros produtores ou mesmo perturbações nas fontes primárias de energia dos geradores síncronos.

1.2 - Objectivos

Este trabalho visa resolver o problema que, habitualmente, ocorre quando se pretende efectuar a simulação dinâmica de um sistema eléctrico real: obter o valor dos parâmetros para um modelo disponível, em ferramentas de simulação dinâmica, do sistema de excitação de uma máquina síncrona, quando o modelo fornecido pelos fabricantes não corresponde a nenhum dos modelos típicos.

Pretende-se resolver este problema recorrendo ao ajuste do valor dos parâmetros do modelo típico “DC1A”, com o objectivo de minimizar as diferenças da resposta em frequência fornecidas pelos dois modelos (o fornecido pelos fabricantes e o típico ajustado). Esta resolução será efectuada recorrendo à aplicação de um processo de optimização.

A qualidade dos resultados obtidos será comprovada recorrendo à comparação da resposta temporal fornecida, por cada um dos sistemas de excitação, a um aumento em degrau na tensão de referência do sistema de excitação. Para tal, recorreu-se à aplicação “PSIM” da empresa “PowerSim” e à plataforma de simulação SIMULINK disponível no MATLAB.

1.3 - Descrição geral dos restantes capítulos da tese

No capítulo 2, é feita uma introdução aos sistemas de excitação, sendo explanadas as diferenças entre os tipos de sistemas de excitação mais comuns e respectiva evolução. São feitas, também, considerações quanto à adopção de diferentes tipos de sistemas de excitação. Por último, é detalhado o modelo de sistema de excitação "DC1A", visto que foi o modelo típico escolhido para fazer a emulação por ajuste dos respectivos parâmetros.

De seguida, no capítulo 3, faz-se a exposição de dois assuntos relacionados com o tema do trabalho em estudo. O primeiro assunto foi a apresentação de técnicas de melhoria de desempenho de sistemas de excitação. O segundo foi a estimação de parâmetros para um modelo de sistema de excitação, no domínio do tempo, através dos sinais de entrada e saída do sistema de excitação.

No entanto, primeiramente foi realizada uma introdução ao tema, recorrendo à caracterização dos pequenos sinais do sistema de excitação e respectivos índices de qualidade, que se traduzem na determinação e/ou quantificação da estabilidade de um sistema de excitação.

Posteriormente, no capítulo 4, foi feita uma introdução aos diferentes tipos de abordagem que foram investigados e até mesmo utilizados na criação de uma solução para o problema de ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A".

Neste capítulo, a metodologia desenvolvida para o ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A" para o caso de teste é apresentada, tal como os resultados do caso de teste. Os resultados são mostrados através da respectiva comparação da resposta em frequência e, também, das simulações da resposta no domínio dos tempos em função do aumento em degrau na tensão de referência dos sistemas de excitação.

De seguida, no capítulo 5, é feita a avaliação do desempenho da metodologia desenvolvida, da qual resultou a criação da aplicação "DC1Atuning", sendo apresentado os resultados de emulação obtidos para outros sistemas de excitação (casos de estudo).

Por último, no capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e as conclusões tiradas da análise dos resultados obtidos e são propostos futuros estudos relativos a este tema.

Capítulo 2

Sistemas de excitação: Constituição e modelos utilizados para a análise da estabilidade

2.1 Introdução

O objectivo de qualquer sistema de excitação consiste em alimentar com corrente contínua o enrolamento de campo do gerador síncrono e estabelecer funções de controlo, de protecção e de compensação de carga, para que seja possível obter um comportamento funcional e estável do gerador síncrono e dos sistemas eléctricos de energia aos quais se encontra interligado.

O gerador síncrono é composto por duas partes magnéticas principais: o estator e o rotor. No estator são dispostos enrolamentos que interligam a máquina ao sistema de energia eléctrica. Por eles circulam correntes eléctricas que permitem garantir a potência solicitada pelo sistema de energia eléctrica. No rotor são encontrados dois tipos de enrolamentos: os enrolamentos de campo ou de excitação, os quais são responsáveis pela produção do fluxo magnético de excitação; e os enrolamentos amortecedores, que têm um papel importante, não só no amortecimento de oscilações de origem mecânica, bem como na qualidade da tensão eléctrica obtida no estator do gerador síncrono.

A acção conjunta da corrente de excitação com o movimento do rotor produz uma tensão induzida no estator. Nos enrolamentos do estator, caso a máquina esteja interligada ao sistema eléctrico de energia, circulará corrente alternada.

Mostra-se necessário fazer o ponto de situação do estado da arte das soluções de sistemas de excitação usualmente utilizados em projectos de engenharia. Assim sendo, existem dois

tipos principais de sistemas de excitação: o sistema de excitação rotativo e o sistema de excitação estático.

O sistema de excitação rotativo é constituído por uma excitatriz, e esta, por sua vez, pode ser um gerador de corrente contínua, uma máquina de relutância ou um alternador consoante a configuração adoptada.

O sistema de excitação estático prevê a substituição da excitatriz pela utilização directa de rectificadores.

Em [1], o IEEE prevê 19 configurações básicas de sistemas de excitação, sendo 12 do tipo rotativo e 7 do tipo estático, nomeadamente as seguintes:

- Sistema de excitação rotativo
    - Sistema de excitação DC
        - DC1A
        - DC2A
        - DC3A
        - DC4B
    - Sistema de excitação AC
        - AC1A
        - AC2A
        - AC3A
        - AC4A
        - AC5A
        - AC6A
        - AC7B
        - AC8B
- Sistema de excitação estático
    - Sistema de excitação ST
        - ST1A
        - ST2A
        - ST3A
        - ST4B
        - ST5B
        - ST6B
        - ST7B

2.2 Sistema de Excitação Rotativo

2.2.1 Sistema de Excitação DC

Em termos históricos, o sistema de excitação DC foi amplamente usado na década de 20, e era composto por uma excitatriz e um regulador de tensão. A excitatriz era, normalmente, constituída por um gerador de corrente contínua montado no eixo do gerador síncrono. Já o sistema de regulação de tensão ficava a cargo do operador.

Actualmente, o sistema de excitação DC baseia-se no sistema clássico, em que a excitatriz consiste numa máquina eléctrica de corrente contínua que funciona como gerador e é através de colectores que se fornece a corrente contínua para o rotor do gerador síncrono. Este tipo de excitatriz poderá ser accionado por um motor ou pelo eixo gerador síncrono.

O regulador de tensão do sistema detecta o nível de tensão, compara-o com uma referência e, se necessário, actua na excitatriz por meio de um reóstato para efectuar o controlo da excitação da máquina principal. Na figura 2.1, apresenta-se a confirmação típica de um sistema de excitação rotativo DC, tal como se descreve em [2].

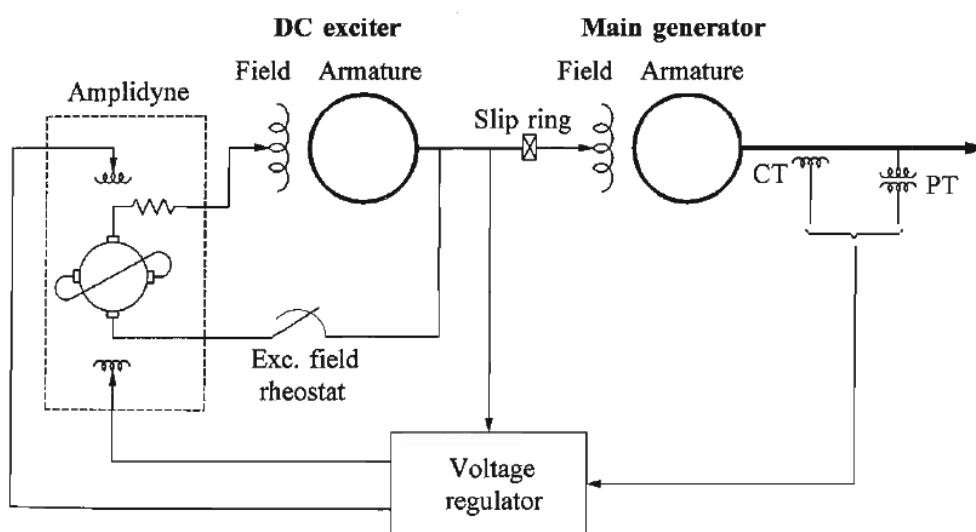



Figura 2.1 - Representação de um sistema de excitação rotativo DC (retirado de [2])

Em certos casos, com o aperfeiçoamento dos sistemas de excitação, a excitatriz, ao invés de ser auto-excitada, passou a ser excitatriz de excitação separada.

Ambas são acopladas ao veio do alternador, evitando-se, desta forma, o uso de qualquer fonte de alimentação externa. Assim, o controlo de campo da excitatriz passou a ser independente da sua tensão de saída, conseguindo-se diminuir o tempo de resposta do sistema.

Com o incremento da potência nominal das máquinas síncronas, o uso do sistema de excitação de corrente contínua passou a mostrar algumas desvantagens, tais como:

- Elevadas correntes de excitação com uma baixa tensão, necessitando de um número elevado de escovas, o que se traduzia numa elevada manutenção;
- Problemas inerentes ao comutador, provocando faiscamento e geração de arcos eléctricos durante abruptas variações de carga;
- Contrariedades no acoplamento de enormes máquinas DC ao eixo do gerador, que podem rodar a velocidades elevadas como no caso dos turbo geradores.

Face o exposto, o sistema de excitação rotativo DC passou a ser cada vez menos utilizado devido ao elevado número de paragens para manutenção e ao desgaste mecânico dos seus elementos, principalmente das escovas. Assim sendo, foi necessário intensificar os estudos sobre um sistema de excitação que usasse uma excitatriz de corrente alternada e rectificadores.

2.2.2 Sistema de Excitação AC

Inicialmente, a substituição de uma excitatriz de corrente contínua e de um sistema de engrenagens de redução por uma excitatriz de corrente alternada e rectificadores trouxe, não só um pequeno aumento de custo, como também o problema técnico que se prendia com o facto dos primeiros sistemas usarem rectificadores com díodos de germânio, cuja baixa tensão máxima inversa parecia ser insuficiente para satisfazer as necessidades dos grandes geradores.

Não obstante estes inconvenientes, tornou-se claro que o aumento do custo inicial era largamente compensado pela reduzida manutenção necessária e pela utilização de díodos de silício, o que elevou a máxima tensão inversa para valores satisfatórios.

Assim, deixou se de usar o sistema de excitação DC em novas instalações, quer em centrais hidroeléctricas, quer em centrais térmicas.

Contudo, quando se mostre necessário realizar um aumento de potência em geradores que já sejam compostos por este sistema, pode ser exequível manter-se a excitação rotativa DC, substituindo, apenas, alguns componentes essenciais, como o regulador de tensão, por um regulador micro processado com uma excitatriz estática de pequena potência para alimentar o campo da excitatriz rotativa de corrente contínua.

No sistema de excitação AC, a corrente é produzida por um gerador de corrente alternada e esta, por sua vez, é, posteriormente, transformada em corrente contínua para alimentar o enrolamento do campo através de rectificadores de potência, os quais podem ser controlados ou não controlados. É necessário referir que o gerador de corrente alternada encontra-se, normalmente, acoplado no mesmo eixo que o gerador principal.

Caso os rectificadores sejam não controlados (rectificadores com díodos), o controlo do sistema é efectuado a partir de uma ou mais bobines de campo da excitatriz AC.
Tendo em conta determinadas características, tais como a combinação dos rectificadores, o método utilizado para o controlo da saída da excitatriz e a fonte de excitação utilizada, pode-se catalogar os sistemas de excitação AC em dois tipos básicos:

- Sistema de excitação AC com rectificação estática, onde os díodos não se encontram acoplados ao eixo do rotor (Uma configuração típica deste tipo de sistema, apresenta-se na figura 2.2);
- Sistema de excitação AC com rectificação rotativa, onde os díodos rodam à mesma velocidade do rotor "Brushless" (uma configuração típica deste tipo de sistema, apresenta-se na figura 2.3).

Embora o sistema de excitação AC com rectificação estática elimine o colector e escovas associados à excitatriz de corrente contínua, o mesmo está em desuso pois ainda tem o inconveniente de conter os anéis deslizantes do gerador, que, por sua vez, também apresentam problemas de manutenção.

Os sistemas de excitação a gerador de corrente contínua ou com excitatrizes de corrente alternada com rectificadores estáticos necessitam de transferir a corrente de excitação de um equipamento (excitatriz corrente contínua, rectificador) para o campo do gerador através de anéis colectores e escovas, o que constituía uma desvantagem à medida que havia um aumento nominal dos geradores, pelo que se tornou necessário encontrar uma alternativa para contrariar o problema.

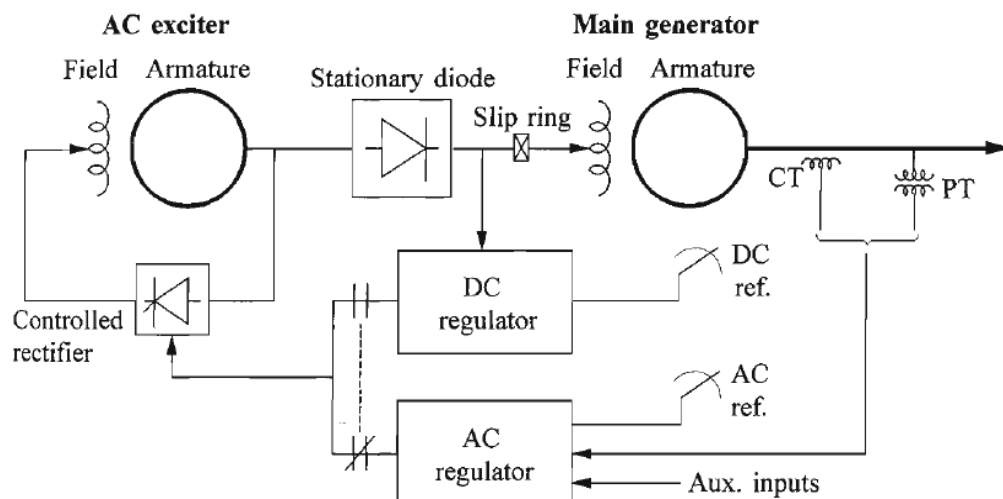



Figura 2.2 - Representação de um sistema de excitação AC com rectificação estática (retirado de [2])

Para solucionar o problema, projectou-se então o sistema de excitação AC com rectificação rotativa visto que eliminava, em definitivo, os anéis colectores e as escovas a eles associados (Brushless). Neste caso, o rectificador rotativo é colocado no eixo comum ao

gerador principal juntamente com a excitatriz de corrente alternada, com um circuito indutor estatórico e com um circuito induzido rotórico. O controlo da tensão de saída do gerador mantém-se constante através de um regulador de tensão. O regulador monitoriza a tensão de saída e alimenta o campo do excitador com a corrente necessária para gerar tensão alternada, que, após ser rectificada pelo rectificador rotativo, alimenta o enrolamento do campo do gerador síncrono.

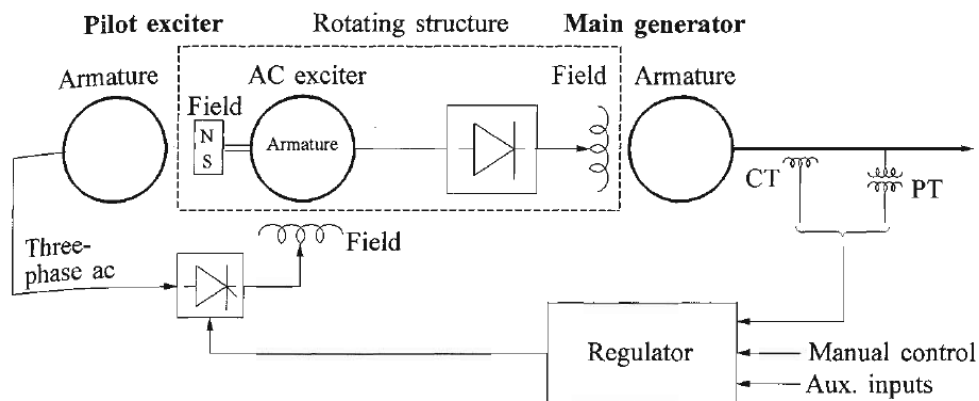



Figura 2.3 - Representação de um sistema de excitação AC com rectificação rotativa (retirado de [2])

A principal desvantagem deste sistema reside no facto dos rectificadores e respectivos dispositivos de protecção serem sujeitos a elevadas forças centrífugas. Contudo, um outro inconveniente associado a esta tecnologia, que teria de ser ultrapassado, era a necessidade da capacidade das excitatrizes de corrente alternada fornecerem a mesma tensão que as excitatrizes de corrente contínua com uma constante de tempo baixa.

Com o desenvolvimento da tecnologia dos semicondutores, alcançou-se o objectivo de fabricar rectificadores capazes de aguentar os esforços rotacionais com uma constante de tempo reduzida, o que permitiu utilizar estes semicondutores a frequências de comutação mais elevadas.

Desta forma, o sistema de excitação rotativo AC (Brushless), quando aplicado em geradores de alta rotação, nomeadamente em centrais térmicas, torna-se bastante vantajoso, desde que a corrente de campo não seja demasiado elevada. Caso contrário, verificar-se-ia uma inflação do custo e excesso de peso do conjunto sistema de excitação.

O sistema de excitação AC com rectificação rotativa contém inúmeras características favoráveis, tais como:

- Não necessita de escovas e anéis;
- Não injecta interferências geradas por mau contacto;
- Não introduz deformações na tensão da rede e a forma de onda é sinusoidal;
- Tem manutenção reduzida, precisando apenas de cuidados na lubrificação dos rolamentos;
- Também permite facilmente o controlo manual.

Assim sendo, o sistema de excitação AC com rectificação rotativa é aconselhado para aplicação em turbo geradores de grande porte, pelo facto destes sistemas não necessitarem de uma resposta rápida, tendo em conta a sua localização, normalmente, próxima dos centros de carga, e, também, pela necessidade de elevados valores de corrente de excitação.

2.3 Sistema de Excitação Estático

No sistema de excitação estático, todos os componentes principais são estáticos. A alimentação do campo do gerador é realizada directamente por rectificadores estáticos controlados, sendo os mesmos alimentados ou pelos terminais do gerador ou pelo barramento auxiliar da central eléctrica (ver exemplo de configuração na figura 2.4).
Estes sistemas podem ser classificados nas seguintes categorias:

- Sistemas de excitação com rectificadores controlados, alimentados pelo barramento auxiliar da central eléctrica;
- Sistemas de excitação com rectificadores controlados, alimentados por transformador (ligado aos terminais do gerador);
- Sistemas de excitação com rectificadores controlados de alimentação composta.

O sistema de excitação estático apresenta vantagem em relação ao rotativo, na medida em que diminuiu o tempo de resposta na regulação, pois actua directamente no enrolamento de campo do gerador síncrono, reduzindo, desta forma, o comprimento total da unidade por supressão das excitatrizes. Todavia, estes sistemas apresentam, também, um inconveniente decorrente do facto do fluxo de corrente ser controlado por impulsos dos semicondutores de potência, os quais introduzem deformações na corrente, o que provoca distorção da tensão gerada pelo alternador.

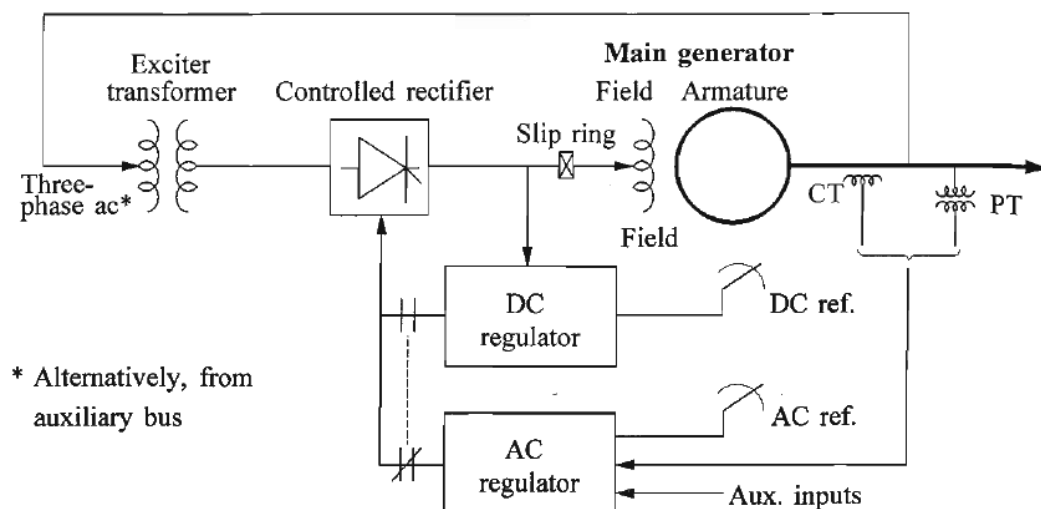



Figura 2.4 - Representação de um sistema de excitação estático (retirado de [2])

Além disso, todas as configurações do sistema de excitação estático possuem anéis colectores para a alimentação do enrolamento de campo do gerador síncrono através dos rectificadores estáticos. Embora este facto constitua uma desvantagem, a mesma torna-se irrelevante quando se comparam os tempos extremamente rápidos de resposta deste sistema de excitação.

Quanto ao sistema de excitação estático, este fornece e controla directamente a corrente de enrolamento de campo através de um rectificador controlado por um Regulador Automático de Tensão (AVR), micro processado ou analógico, sem necessidade de mecanismos intermediários, tais como as excitatrizes de corrente contínua ou alternada existentes nos sistemas rotativos. O sistema de excitação estático poderá ser aplicado em centrais hidroeléctricas ou termoeléctricas, pois tem várias vantagens, nomeadamente:

- Possibilidade de reduzir o tempo de resposta de recuperação da tensão do conjunto gerador e sistema de excitação, pois não existe uma componente (excitatriz Brushless) de atraso na malha de excitação;
- Permite a medição de temperatura no rotor através da variação da resistência de campo, dado que o sistema de excitação contém informações, em tempo real, da corrente e também da tensão do rotor. Assim sendo, é possível supervisionar a resistência do enrolamento do campo, a qual é directamente proporcional à temperatura do rotor;
- Permite a implementação da protecção de falha à terra do rotor, a qual só é possível com o acesso ao enrolamento do rotor, tal como acontece no sistema de excitação estática;
- Aumento da capacidade de controlo de oscilações (tensão e potência), através da introdução de um sinal suplementar;
- Caso seja necessário proceder à manutenção, a mesma pode ser efectuada com a máquina em funcionamento, no caso do sistema de excitação com redundância em pontos críticos;
- Permite modificar os parâmetros que influenciam a resposta do sistema com o gerador em serviço, caso o mesmo contenha um regulador micro processado;
- Proporciona um incremento na facilidade de aquisição de dados para o sistema de protecção e supervisão, como por exemplo, a detecção de falha à terra no sistema indutor.

Desta forma, o sistema de excitação estática é mais indicado para a maioria das aplicações devido, não só ao seu baixo custo monetário, mas também ao bom desempenho, sendo instalado, praticamente, em todas as novas instalações.

2.4 Sistema de Excitação típico “DC1A”

O objectivo deste trabalho consiste no ajuste dos parâmetros de um modelo típico de sistema de excitação de forma a minimizar as diferenças na resposta em frequência entre o modelo típico e o modelo fornecido pelo fabricante.

O modelo típico “DC1A”, foi universalmente aplicado pela indústria, e é, usualmente, utilizado para representar outros tipos de sistemas de excitação, quando faltam dados mais detalhados sobre esses modelos ou quando é necessário que esses modelos sejam simplificados [1]. Por este motivo, quando se verifica que, noutros modelos estandardizados pelo IEEE, determinados parâmetros podem ser anulados, estes mesmos modelos podem ser representados pelo modelo “DC1A”.

Desta forma, neste trabalho tornou-se óbvia a adopção do modelo típico “DC1A”, tendo sido os seus parâmetros alvo de ajuste necessários para se conseguir emular a resposta em frequência de outros sistemas de excitação.

Assim sendo, iremos descrever, em detalhe, o modelo típico de sistema de controlo da excitação “DC1A”.

O diagrama de blocos que descreve qualquer sistema de controlo de excitação apresenta-se na figura 2.5, sendo composto pelos seguintes elementos:

- Excitatriz (1);
- Regulador de tensão (2);
- Transdutor da tensão eléctrica terminal do gerador síncrono e compensador de carga (3);
- Estabilizador (4);
- Limitadores e circuitos de protecção (5).

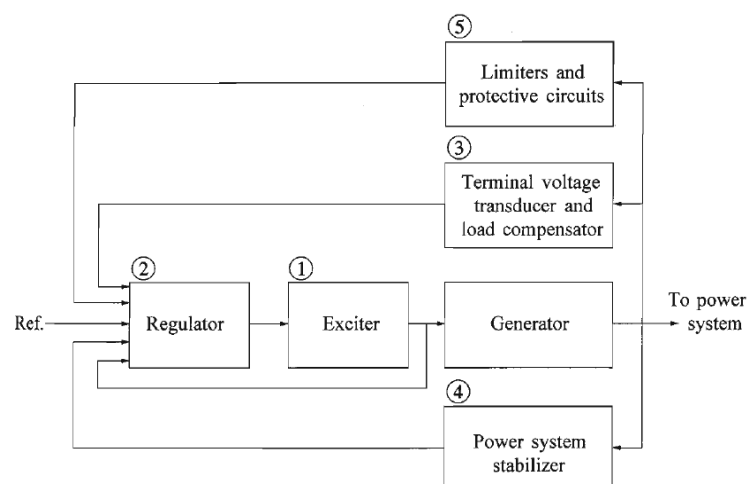



Figura 2.5 - Diagrama de blocos de um sistema de controlo de excitação (retirado de [2])

A excitatriz tem como função fornecer corrente contínua ao enrolamento de campo do gerador síncrono e é definida como a etapa de alta tensão do sistema de excitação. Por sua vez, o regulador de tensão consiste no tratamento e amplificação dos sinais de entrada do regulador, até ao nível e forma considerados apropriados pelo controlo do sistema de excitação. Neste bloco estão definidas funções de estabilização da regulação da excitação (diagrama de blocos do tipo "feedback" e diagrama de bloco de redução do ganho transitário), das quais se destacam as seguintes:

- Controlar a tensão terminal da máquina, dentro dos limites prescritos;
- Regular a divisão de potência reactiva entre máquinas que operam em paralelo, particularmente quando estas se encontram interligadas pelo mesmo barramento, sem nenhum transformador entre as máquinas;
- Controlar de perto a corrente de campo, para manter a máquina em sincronismo com o sistema eléctrico de energia, quando esta opera ou não a factor de potência unitário;
- Aumentar a excitação sob condições de curto-circuito no sistema, para manter a máquina em sincronismo com os demais geradores do sistema;
- Amortecer oscilações de baixa frequência, as quais podem trazer problemas de estabilidade dinâmica.

O transdutor de tensão eléctrica terminal do gerador síncrono mede a tensão eléctrica nos terminais deste gerador, rectifica e, posteriormente, filtra essa medida para uma quantidade de corrente contínua e compara essa quantidade com uma referência que representa o valor desejável da tensão eléctrica nos terminais do gerador síncrono.

No sistema de excitação pode estar incluído um compensador de carga, com o objectivo de manter constante a tensão eléctrica num dado ponto do sistema de excitação, que não a tensão eléctrica terminal do gerador síncrono. Assim, as variações não revertem na totalidade e de imediato na variação do valor de tensão terminal do gerador síncrono.

O estabilizador fornece ao regulador um sinal adicional de entrada, de forma a remover oscilações no sistema eléctrico de energia. Alguns dos sinais de entrada mais usados, para este bloco, são o desvio da velocidade do rotor, a potência de aceleração e o desvio da frequência, entre outros.

Os circuitos de protecção e de limitação incluem uma grande variedade de funções de controlo e de protecção, que garantem que as limitações do sistema de excitação e respectivo gerador síncrono não são excedidas. Algumas das funções mais usadas são a limitação da corrente de campo, a limitação de sobre-excitação, a limitação da tensão eléctrica terminal do gerador síncrono, o regulador e a protecção de tensão eléctrica/frequência eléctrica, e a limitação de sub-excitação. Estes são circuitos distintos e as suas saídas podem ser aplicadas em diferentes locais do diagrama de blocos do sistema de excitação, como bloco de soma ou "gate" de entrada.

A estrutura do modelo do sistema de controlo de excitação depende, obviamente, do tipo de sistema de excitação adoptado. O IEEE estandardizou 19 estruturas típicas, sob a forma de diagramas de bloco, para os diferentes tipos de sistemas de excitação atrás mencionados.

O modelo do sistema de excitação típico “DC1A”, abordado nesta tese e estandardizado pelo IEEE, representa um gerador de corrente contínua, como excitatriz, que controla o fluxo magnético induzido através do enrolamento de campo no gerador síncrono, actuando continuamente no regulador de tensão eléctrica.

A excitatriz pode ser auto-excitada ou possuir excitação separada, sendo o primeiro tipo a mais comum.

Abaixo, encontra-se representado o diagrama de blocos do modelo típico de sistema de controlo de excitação “DC1A”.

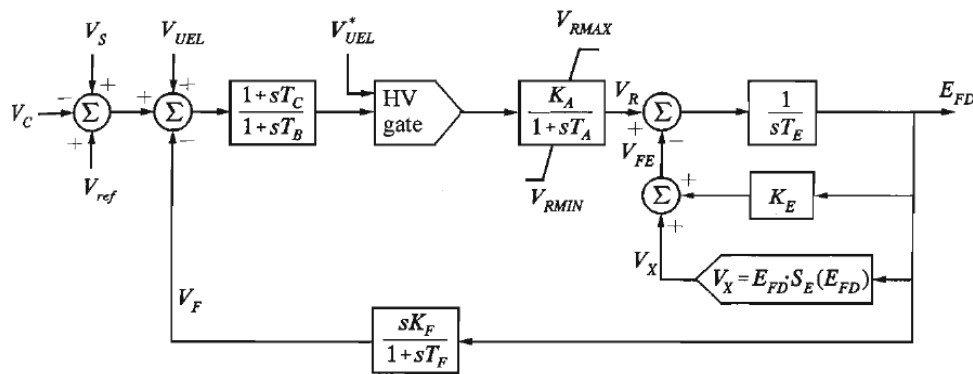



Figura 2.6 - Representação do diagrama de blocos do modelo típico de sistema de excitação “DC1A” (retirado de [2])

O principal sinal de entrada do sistema de excitação é a saída do sinal “Vc” que corresponde à tensão eléctrica nos terminais do gerador síncrono.

A função de transferência do sinal “Vc” é, normalmente, caracterizada por um ganho unitário e uma constante de tempo. A saída do bloco do transdutor de tensão eléctrica terminal “Vc” é definida como uma tensão contínua proporcional à tensão terminal do gerador síncrono.

No primeiro ponto de soma, o sinal “Vc” é subtraído ao valor da tensão eléctrica de referência “Vref” e, quando usado, à saída do sinal do estabilizador “Vs”, resulta daí um sinal de erro que controla o sistema de excitação.

O sinal de saída deste ponto de soma é usualmente designado por “Verr”.

No segundo ponto de soma, o sinal de limitação de sub-excitação “Vuel”, que é usado devido a possíveis situações de operação extremas, é adicionado à saída do sinal do primeiro ponto de soma, sendo ambos subtraídos pelo sinal “Vf”. O sinal “Vf” deriva da tensão eléctrica do enrolamento de campo do gerador síncrono e é representado por um ganho de realimentação negativa “Kf” e uma constante de tempo “Tf”. O ajuste dos parâmetros do

bloco de compensação/estabilização do sinal “Vf” permite minimizar os desvios de fase introduzidos pelos atrasos nos diversos elementos do sistema de excitação.

O sinal de limitação de sub-excitação tem como objectivo prevenir a redução do nível de excitação do gerador síncrono, quando o limite da estabilidade em regime permanente ou o limite sobre temperatura dos enrolamentos estatóricos do gerador síncrono são ultrapassados.

O sinal de controlo “Vuel” é derivado da combinação da tensão eléctrica, da corrente eléctrica, das potências activa e reactiva do gerador síncrono. O limite é determinado pelo valor excessivo da combinação das grandezas acima mencionadas, face a um valor de referência.

Em regime permanente, “Vs” e “Vf” têm valor “0” e “Vref” encontra-se definido por um único valor para a condição de carga do gerador síncrono. Assim sendo, o sinal de erro “Verr” resulta na solicitação de tensão eléctrica do enrolamento de campo do gerador síncrono, “Efd”.

O regulador de tensão é constituído por um compensador “lead-lag” ou bloco de redução do ganho transitório, e um amplificador. O bloco designado “HV gate” corresponde a um bloco de função de maximização que poderá ser utilizado, como alternativa, para entrada do sinal “Vuel”.

O regulador de tensão utiliza, normalmente, fontes de alimentação que não são afectadas por efeitos transitórios rápidos com origem no gerador síncrono ou nos barramentos auxiliares. O bloco de compensação “lead-lag” utiliza os parâmetros “Tb” e “Tc” como constantes de tempo de redução do ganho transitório a altas frequências inerentes à operação do regulador de tensão. Todavia, estas constantes são, frequentemente, tão pequenas que podem ser negligenciadas ou definidas com valor “0”.

O bloco amplificador do regulador de tensão consegue garantir ganhos elevados e baixas constantes de tempo. Este é representado por uma função de transferência de primeira ordem, cujo ganho é representado pelo parâmetro “Ka” e cuja constante de tempo se encontra definida pelo parâmetro “Ta”.

Adicionalmente, os limites, máximo e mínimo, de tensão à saída do amplificador têm que ser considerados no modelo. De outro modo, a introdução de grandes sinais de erro na entrada do regulador poderiam produzir saídas que excederiam os limites técnicos do sistema de excitação.

O sinal de saída do regulador “Vr” é utilizado para controlar a excitatriz, a qual poderá ser auto-excitada ou de excitação separada. O bloco da excitatriz é traduzido pela seguinte expressão:

$$V_r = Te * \frac{dE_{FD}}{dt} + Ke * E_{FD} + S_E(E_{FD}) * E_{FD} \qquad (2.1)$$

O termo “ $S_E(E_{FD})$ ” resulta de uma função não linear, definida para dois ou mais valores de “Efd” e que corresponde à saturação, para um determinado valor de tensão eléctrica do enrolamento de campo do gerador síncrono “Efd”.

Tendo em conta que a parcela “ $S_E(E_{FD}) * E_{FD}$ ” representa apenas a saturação da excitatriz, no presente trabalho, o modelo “DC1A” utilizado foi simplificado através da não consideração desta parcela. A função de transferência resultante é a seguinte:

$$V_r = sTe * E_{FD} + Ke * E_{FD} \Rightarrow \qquad \frac{E_{FD}}{V_r} = \frac{1}{Ke + sTe} \tag{2.2}$$

Quando a excitatriz é do tipo auto-excitada, o valor do parâmetro de ganho “Ke” reflecte o ajuste do reóstato de campo do gerador de corrente contínua. Em certas circunstâncias, o valor de “Ke” poderá ser negativo.

Quando a excitatriz é do tipo de excitação separada, o ajuste do reóstato de campo do gerador de corrente contínua é realizado remotamente. Nas excitatrizes de excitação separada o valor típico de “Ke” é “1”.

Ambos os tipos de excitatrizes têm sempre associada uma constante de tempo designada por “Te”.

Das simplificações consideradas no modelo, atrás representado, resulta o seguinte diagrama de blocos do sistema de controlo da excitação:

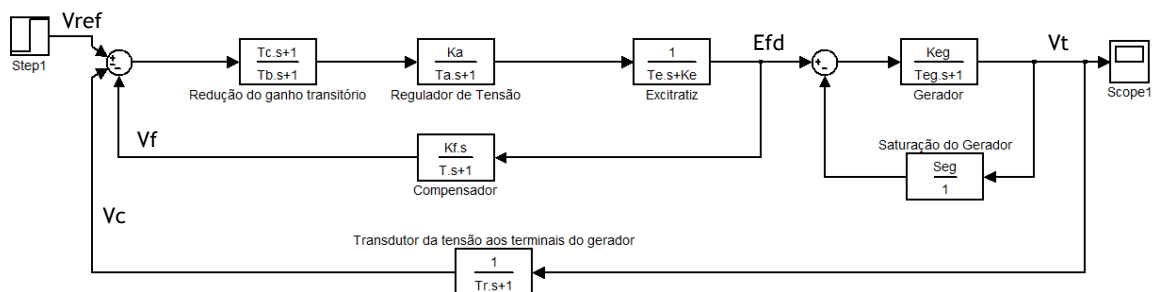



Figura 2.7 - Representação do diagrama de blocos do modelo típico de sistema de controlo de excitação “DC1A”

Os parâmetros “Keg”, “Teg” e “Seg” correspondem, respectivamente, ao valor do ganho, à constante de tempo e ao valor de saturação do gerador síncrono de teste.

O parâmetro “Tr” corresponde à constante de tempo associada ao transdutor de tensão que está montado nos enrolamentos estatóricos do gerador síncrono.

O nosso estudo irá debruçar-se, apenas, sobre o sistema de excitação, ou seja, sobre o regulador automático de tensão e respectiva excitatriz, cujo diagrama de blocos se apresenta na figura 2.8 seguinte.

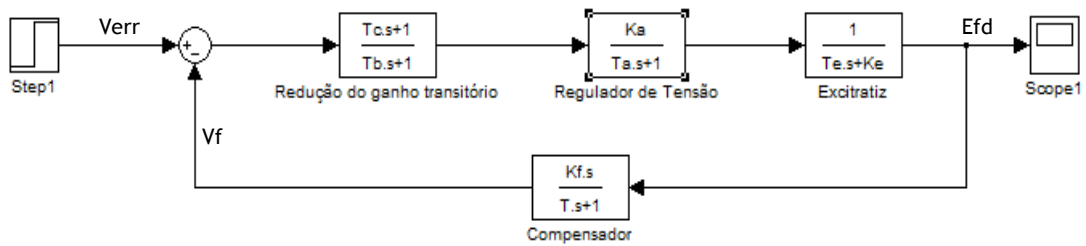



Figura 2.8 - Representação do diagrama de blocos do modelo típico de sistema de excitação "DC1A"

A função de transferência resultante do modelo de sistema de excitação, atrás apresentada, é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{E_{FD}}{V_{ERR}} = \frac{Ka*(1+sTc)*(1+sTf)}{(1+sTb)*(1+sTa)*(Ke+sTe)*(1+sTf)+Ka*s*(1+sTc)*Kf} \qquad (2.3)$$

Em que, o sinal "Verr" é fornecido pelo bloco designado por "Step1" na figura atrás.

Este modelo típico será usado no trabalho, cujo ajuste dos respectivos parâmetros tem como objectivo minimizar as diferenças da resposta em frequência, relativamente a um modelo fornecido pelo fabricante que não apresente uma estrutura equivalente ao modelo DC1A, atrás explanado.

2.5 Conclusões

Neste capítulo fez-se uma introdução aos sistemas de controlo da excitação de geradores síncronos e respectiva evolução histórica, bem como, foram apresentadas as vantagens e as desvantagens dos diferentes tipos de sistemas de controlo da excitação.

Adicionalmente, procedeu-se a uma análise detalhada do sistema típico de controlo da excitação "DC1A", visto ter sido o modelo típico de sistema de excitação escolhido para ser alvo de ajuste dos respectivos parâmetros, com objectivo de emular a resposta em frequência de um outro sistema de excitação.

A escolha recaiu neste modelo típico por ter sido universalmente aplicado pela indústria, sendo, usualmente, utilizado para representar outros tipos de sistemas de excitação, quando faltam dados mais detalhados sobre esses modelos ou quando é necessário que esses modelos sejam simplificados [1].

Capítulo 3

Ajuste dos parâmetros para modelos de excitação

3.1 Introdução

O desempenho de um sistema de controlo de excitação depende das características do sistema de excitação, do gerador síncrono e do sistema eléctrico de energia. Quando este sistema é não linear, para melhor análise do comportamento dinâmico do sistema de controlo de excitação, é necessário classificar a resposta dinâmica relativamente ao desempenho obtido para dois tipos de sinais: grandes sinais e pequenos sinais.

O desempenho para grandes sinais corresponde à resposta que envolve sinais grandes o suficiente para que não seja possível desprezar as não linearidades do sistema. O desempenho para pequenos sinais corresponde à resposta obtida para sinais que são pequenos o suficiente para que as não linearidades sejam insignificantes, logo a resposta para esses sinais é linear.

O objectivo do desempenho para grandes sinais é fornecer meios de avaliação do desempenho de sistemas de excitação, para efeitos transitórios que possam afectar a estabilidade transitória, devido a grandes variações de tensão e de corrente eléctrica nos terminais dos enrolamentos estatóricos do gerador síncrono, tal como, corrente eléctrica induzida no enrolamento de campo dos geradores síncronos.

Os critérios de avaliação do desempenho para grandes sinais são a resposta transitória, as correntes e as tensões eléctricas limite do sistema de excitação, os tempos de resposta da tensão eléctrica e a resposta nominal do sistema de excitação [3].

O objectivo do desempenho para pequenos sinais é fornecer meios de avaliação da resposta de sistemas de excitação a variações incrementais do valor da carga do gerador síncrono, do valor da tensão eléctrica e do valor da velocidade de rotação do rotor do gerador síncrono [3].

Os dados provenientes do desempenho dos pequenos sinais são úteis, uma vez que fornecem meios de determinação e de verificação dos parâmetros de sistemas de excitação, possibilitando, desta forma, a realização de estudos sobre esses mesmos sistemas.

Tradicionalmente, o desempenho para grandes sinais esteve sempre mais associado à especificação e teste de equipamentos, enquanto o desempenho para pequenos sinais esteve sempre associado à estabilidade de pequeno sinal e estudo dos modelos. No entanto, ambas as análises são necessárias quando se pretende igualar a resposta a perturbações dos modelos de simulação, durante a especificação e teste de equipamentos [3].

No caso em estudo, a análise irá debruçar-se sobre a estabilidade do sistema de excitação. Assim sendo, a análise de estabilidade de pequeno sinal é fundamental, visto que permite avaliar o desempenho das malhas de controlo dos sistemas de excitação.

3.2 Análise do desempenho para pequenos sinais de um sistema de excitação

O desempenho para pequenos sinais pode ser expresso em termos de índices de desempenho associados à resposta em frequência e à resposta transitória, no dominio do tempo, no tempo das malhas de realimentação do sistema de controlo.

As principais características da resposta transitória do sistema de controlo com malha de realimentação são o tempo de subida, a sobre-elongação máxima e o tempo de estabelecimento. Estas características encontram-se exemplificadas na figura 3.1 seguinte, na qual se apresenta a resposta típica de um sistema de controlo realimentado a uma variação da entrada em degrau.

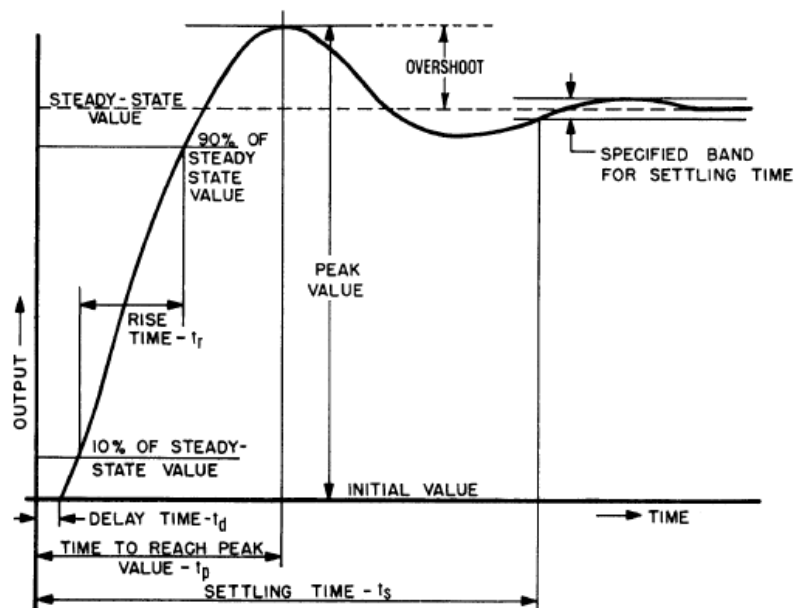



Figura 3.1 - Representação da resposta ao degrau, no domínio dos tempos, de um sistema de controlo realimentado (retirado de [3])

A legenda desta figura é a seguinte:

- "Tr" – tempo de subida;
- "Overshoot" – sobre-elongação máxima;
- "Tp" – tempo para o valor de sobre-elongação máxima;
- "Ts" – Tempo de estabelecimento;
- "Td" – Tempo de atraso.

As características típicas da resposta em frequência em malha aberta de um sistema de controlo de excitação com um gerador síncrono a funcionar em vazio são mostradas na figura seguinte.

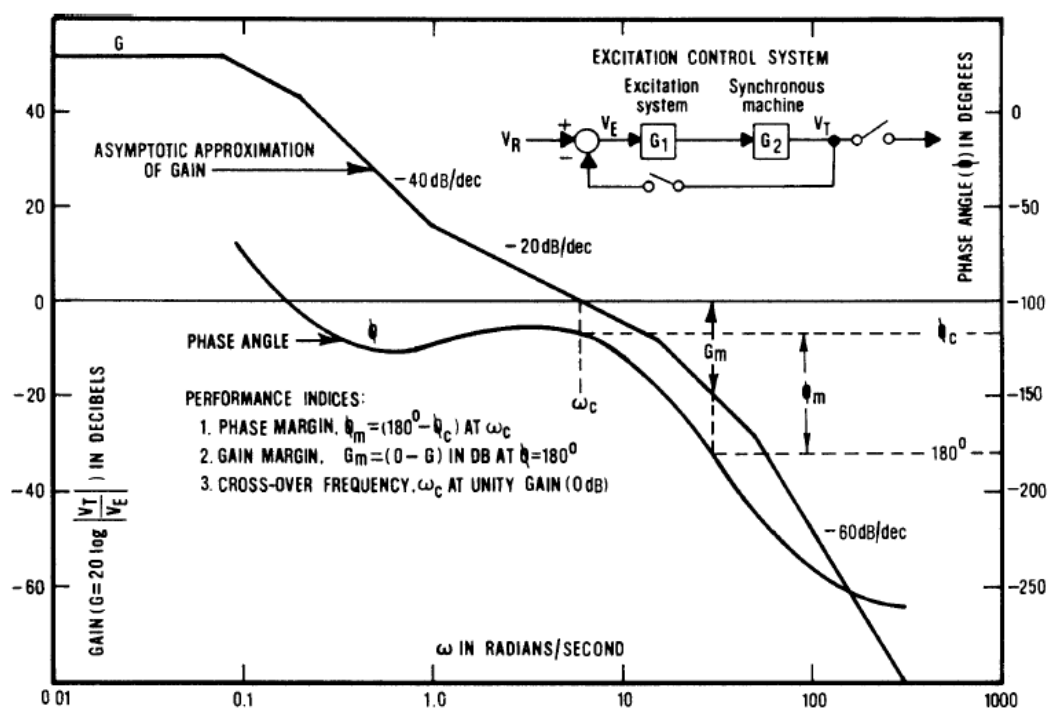



Figura 3.2 - Representação da resposta, no domínio das frequências, em malha aberta de um sistema de controlo com gerador síncrono a funcionar em vazio (retirado de [3])

As principais características que interessa para determinar a estabilidade do sistema são o ganho a baixas frequências "G", a frequência de "crossover" "Wc", a margem de fase "Φm" e a margem de ganho "Gm".

O valor destes índices de desempenho, nomeadamente, o aumento do ganho a baixas frequências "G" e os valores elevados da frequência de crossover "Wc", podem contribuir para aferir uma melhor regulação da tensão do sistema de excitação em regime permanente, visto que são índices que indiciam uma resposta mais rápida do sistema de controlo. Um sistema de controlo realimentado será, tanto mais estável, quanto maiores forem os valores de margem de fase e de ganho.

No entanto, quando se altera algum dos índices atrás mencionados, pode-se obter melhoramentos em um ou mais índices e outros podem ver o seu desempenho piorar.

Por exemplo, o aumento no ganho do regulador altera a curva do diagrama de Bode para cima. Se, por um lado, produz o efeito positivo de aumentar o ganho a baixas frequência e de aumentar a frequência de “crossover”, por outro lado tem o efeito indesejável de baixar as margens de fase e de ganho.

A resposta em frequência em malha fechada realimentada é mostrada na figura 3.3 seguinte.

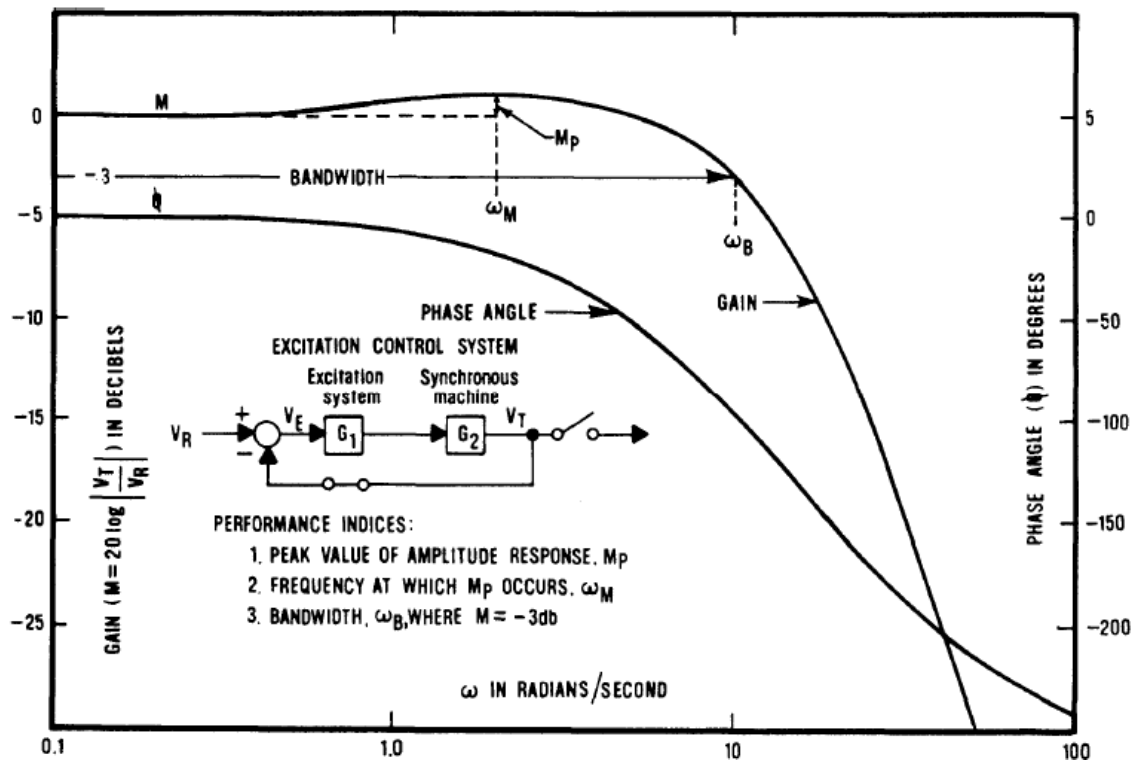



Figura 3.3 - Representação da resposta, no domínio das frequências, em malha fechada de um sistema de controlo realimentado com gerador síncrono a funcionar em vazio (retirado de [3])

Nesta figura, os parâmetros a salientar são a largura de banda “wb”, o valor de pico da característica de ganho “Mp” e a frequência “wm”, quando o valor de pico é atingido.

As características da resposta em frequência em malha aberta são usadas para determinar as margens de fase e ganho, as quais são indicadores de uma estabilidade relativa. A estabilidade relativa em malha fechada com sistema de controlo pode ser determinada através das propriedades do diagrama de Bode, para a função da transferência de um sistema malha aberta. No entanto, este método só pode ser utilizado se a função de transferência não possuir polos e zeros no semi-plano direito de Laplace [3].

A estabilidade relativa de uma malha de realimentação de um sistema de controlo é medida em função das margens de fase e de ganho.

Para determinar a estabilidade, para valores de fase mínimos (todos os polos e zeros encontram-se no semi-plano esquerdo de Laplace), estando o sistema estável, as margens de ganho e de fase devem ser positivas para o sistema de controlo em malha fechada realimentada. Para valores negativos de margens de ganho e de fase, o sistema estará instável em malha fechada realimentada. No geral, para a maioria de sistemas de controlo em malha fechada realimentada, a margem de ganho deve ser superior a 6dB e a margem de fase ser superior a 40º.

Para determinar a estabilidade para valores de fase não mínimos (existem polos e zeros no semi-plano direito de Laplace) e para sistemas estáveis condicionais, é necessária uma análise mais profunda. Podemos dizer que um sistema estável condicional é dito estável num determinado conjunto de valores de ganho, mas muda para instável quando o ganho é diminuído ou aumentado. Normalmente e sempre que seja possível, devem evitar-se os sistemas estáveis condicionais.

No que concerne às características da resposta em frequência em malha fechada, o valor de "Mp" da resposta é também uma medida que está relacionada com a estabilidade. Um valor de "Mp" superior 1,6dB é indicativo de um sistema oscilatório, que exibe na resposta transitória um valor elevado de sobre-elongação. Em geral, para a maioria de sistemas de controlo realimentados, os valores de "Mp" compreendidos entre 1,1 e 1,6 dB constituem boas práticas de dimensionamento de controladores.

A largura de banda "wb" é um índice importante quando se analisa a resposta em frequência do sistema em malha fechada, porque é indicativa do tempo de subida "Tr" ou da velocidade da resposta transitória do sistema. Quando a largura de banda "wb" apresenta valores elevados, a resposta do sistema é rápida. A largura de banda está directamente relacionada com características de filtragem e de rejeição de ruído do sistema.

Normalmente, a largura de banda mede a capacidade de reprodução de sinais de entrada. Nos sistemas realimentados com uma resposta ao degrau que exibe uma sobre-elongação máxima inferior a 10%, o tempo de subida "Tr" está directamente relacionado com a largura de banda "wb".

Globalmente, os índices de desempenho desejados, que caracterizam um bom sistema de controlo realimentado, [3], são:

- Margem de ganho "Gm" superior a 6dB;
- Margem de fase "Φm" superior a 40º;
- Sobre-elongação máxima entre 5% e 15%;
- Valor de pico da amplitude da resposta "Mp" entre 1,1 a 1,6.

Não é possível caracterizar todos os índices de desempenho do sistema de controlo, visto que alguns destes estão relacionados, não só com a velocidade da acção do controlador, mas também com as características dinâmicas do gerador síncrono. Neste grupo de índices estão incluídos:

- Tempo de subida (variável "Tr" da figura 3.1);

- Tempo de estabelecimento (variável “Ts” da figura 3.1);
- Largura de banda (variável “wb” da figura 3.3).

O problema em estudo não consiste em dimensionar um sistema de excitação, mas sim em emular a resposta em frequência de um dado sistema de excitação.

Assim, os parâmetros do modelo típico de sistema de excitação “DC1A” devem ser ajustados para que as diferenças em relação à resposta em frequência do sistema de excitação fornecido sejam minimizadas.

No entanto, a caracterização dos índices de desempenho do sistema de excitação deverão ser idênticos em ambos os modelos (o fornecido e o típico).

3.3 Técnicas para melhoria do desempenho de um sistema de excitação

Apesar de, durante a pesquisa bibliográfica efectuada não se encontrar estudos ou trabalhos desenvolvidos especificamente sobre a emulação da resposta em frequência de sistemas de excitação, existem trabalhos sobre como melhorar o desempenho de um sistema de excitação, como também sobre a estimação de parâmetros de sistemas de excitação através da recolha de dados do funcionamento desses mesmos sistemas. Estes trabalhos permitem-nos fornecer uma visão do que tem sido estudado e investigado nesta área.

De todas as técnicas de melhoria de desempenho de sistemas de excitação, as técnicas baseadas na resposta em frequência são as que possibilitam maiores melhorias de desempenho nos sistemas de controlo. Desta forma, iremos, de seguida, descrever algumas dessas técnicas [4].

Uma das técnicas mais conhecida, consiste no ajuste do ganho “K” da função de transferência, mas tal técnica tem alguns inconvenientes associados.

Normalmente, quando se efectua melhoramentos na malha de controlo tem que se realizar compromissos entre a velocidade do controlador (valores elevados de “wc” e valores elevados de “K”) e estabilidade (valores elevados de margem de fase e valores pequenos de “K”). Este compromisso passa por manter a margem de fase entre 50º e 60º.

Desta forma, quando as constantes de tempo “Tb” e “Tc” do bloco de “lag-lead” apresentam valores idênticos, anulando-se (ver figura 3.4), a escolha do valor do ganho “K”, deve ter apenas em consideração as constantes de tempo do regulador “Ta” e a constante de tempo do gerador síncrono “T’do”.

Assim sendo, o valor do ganho é obtido pela seguinte expressão (retirado de [4]):

$$K < \frac{T'do}{2 * Ta} \qquad (3.1)$$

Em regime permanente, quando o regulador automático de tensão se encontra associado a excitatrizes estáticas, o ganho deve estar limitado a valores inferiores a 50 [4]. O valor de "K" impõe restrições ao desempenho da excitatriz, uma vez que o ganho em regime permanente está directamente relacionado com a regulação da excitatriz.

Em regime permanente (s= jw= 0) e com o gerador síncrono a funcionar em vazio, o sinal de erro (Vref-Vc) será igual a "Efd/Ka". Por exemplo, se o gerador síncrono estiver a funcionar a uma carga nominal com um valor de "Efd" de 2,7 pu e em vazio com um valor de "Efd" de 1,0 pu e "K" com um valor 50, isto significa que, com o valor de tensão eléctrica de referência constante (Vref), a tensão eléctrica do transdutor "Vc" será alterada em (2,7pu)/50)- (1,0pu/50)=3,4% desde os 0% até à carga nominal.

Este tipo de variação de regulação não é aceitável como prática comum. A regulação deve, usualmente, ser inferior a 1%.

Com o intuito de solucionar esta restrição de regulação, deve-se recorrer à utilização do bloco de redução do ganho transitório ou bloco "lag-lead" ao invés de o anular. Este bloco permite solucionar o conflito de objectivos entre um sistema estável, um sistema rápido e um valor baixo de regulação da excitatriz. Desta forma, em modelos que possuam o bloco de redução do ganho transitório e que o mesmo não é anulado, a técnica de melhoramento do desempenho do sistema de excitação acima descrita tem de ser refinada.

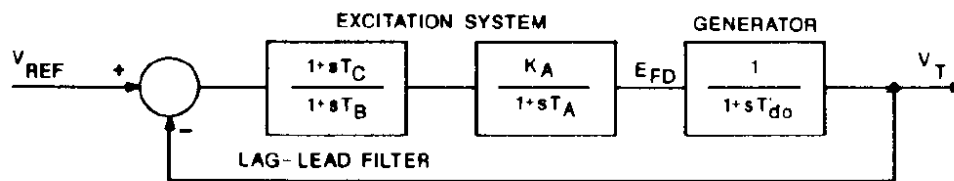



Figura 3.4 - Representação de um diagrama de blocos de um modelo de sistema de excitação com bloco de redução do ganho transitório (retirado de [4])

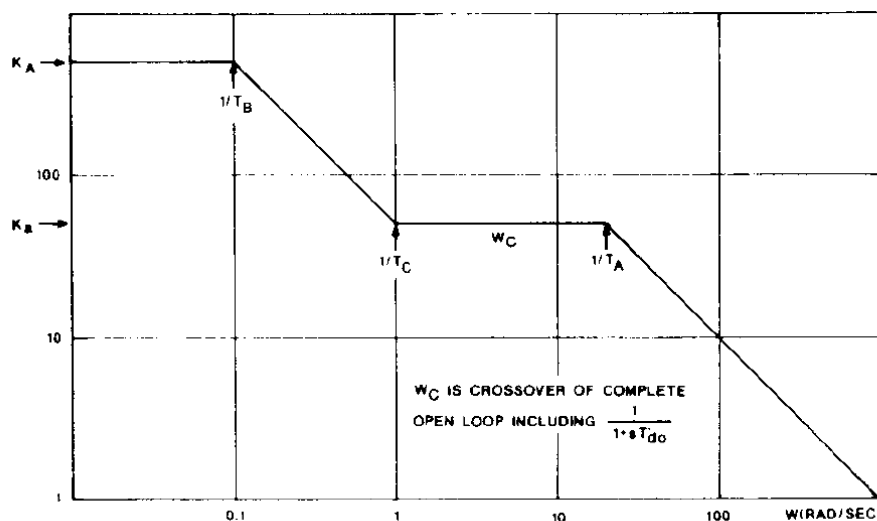



Figura 3.5 - Representação da resposta no domínio das frequências de um modelo de sistema de excitação com bloco de redução do ganho transitório (retirado de [4])

Assim, usando o exemplo anterior, se a constante de tempo do regulador automático de tensão “Ta” for igual a 0,05s e se a constante de tempo do gerador “T’do” for igual 5s, temos um máximo ganho transitório de 5/(2*0,005)=50. A constante de tempo de derivação “Tc” do bloco de redução do ganho transitório pode ser escolhida para que 1/Tc seja 10 vezes inferior à frequência de “crossover” “wc”, isto é, Tc=10*2*0,05=1s. O valor da constante de tempo de integração “Tb” do bloco de redução do ganho transitório deverá ser 10 vezes maior do que o valor de “Tc”.

Então, se o valor de ganho “Ka” do regulador automático de tensão for definido como 500, a capacidade de regulação do sistema de excitação será 1,7/500=0,34%.

O ganho transitório será: K=500*1/10=50, então teremos um sistema estável e a velocidade de regulação será adequada.

Resumindo, a seguir encontram-se descritas as etapas do processo de melhorar o desempenho de um sistema de excitação com bloco de redução do ganho transitório não anulado [4]:

1. Compare o valor de “Ta” e o valor “T’do” com os valores típicos de outros sistemas de controlo de excitação. Face aos requisitos do bloco de regulação da tensão, o valor de “Ka” deve ser superior a 200.

2. Calcule o valor máximo do ganho transitório pela expressão:

$$K < \frac{T'do}{2*Ta} \qquad (3.2)$$

3. Calcule o valor necessário da redução do ganho transitório “T.G.R.”:

$$T.G.R. = \frac{K}{Ka} \qquad (3.3)$$

4. Calcule a frequência desejada de “crossover” “wc”:

$$Wc = \frac{1}{2*Ta} \qquad (3.4)$$

5. Escolha 1/Tc para que seja 3 a 6 vezes inferior a “wc”:

$$Tc = \frac{3-6}{Wc} \qquad (3.5)$$

6. Tendo em conta o valor “T.G.R.” calculado no ponto 3., o valor de “Tb” é obtido pela seguinte expressão:

$$Tb = \frac{Tc}{T.G.R.} \qquad (3.6)$$

O processo de melhoramento do desempenho, atrás descrito, é baseado no modelo típico de sistema de excitação “AC4”.

Relativamente ao modelo típico “DC1A”, a técnica de melhoramento do desempenho do sistema de excitação é, consideravelmente, diferente.

Por exemplo, na técnica que será descrita, um dos procedimentos habituais é igualar os parâmetros “Tc” e “Tb” de forma a anular o bloco de redução do ganho transitório.

Este técnica de melhoria do desempenho do sistema de excitação tem em consideração a estabilidade do regulador automático de tensão, como, também, a estabilidade das malhas interiores do regulador.

Por exemplo, a malha interior do sistema de excitação representado na figura 3.6 é dada pela seguinte expressão:

$$\frac{Ka}{(Ke+S*Te)*(1+S*Ta)}=g \qquad (3.7)$$

E a malha de realimentação é dada pela expressão:

$$\frac{S*Kf}{(1+S*Tf)}=h \qquad (3.8)$$

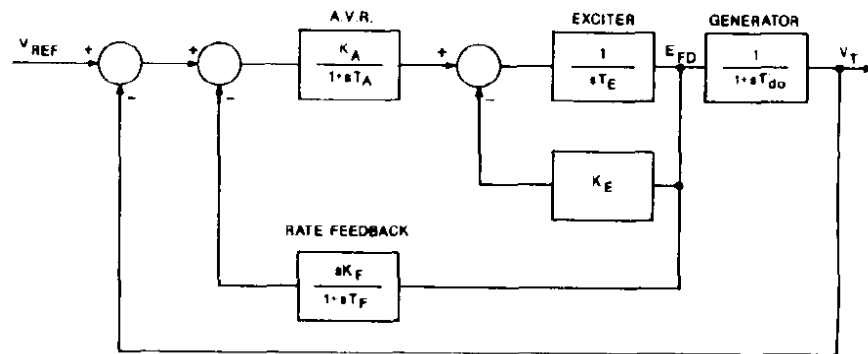



Figura 3.6 - Representação de um diagrama de blocos de um modelo de sistema de controlo de excitação “DC1A” com bloco de redução do ganho transitório anulado (retirado de [4])

Logo, a função de transferência é dada pela seguinte expressão:

$$FT_{DC1A}=\frac{g}{1+g*h} \qquad (3.9)$$

Se g << 1/h, então: g*h << 1 e a função de transferência tem um valor de, aproximadamente, igual a g.

Se 1/h <<g, então: g*h>>1 e a função de transferência é aproximadamente 1/h.

Desta forma, a resposta em malha fechada do sistema de excitação pode ser aproximada pela análise das curvas “g” e “1/h” nos respectivos diagramas de Bode (fig. 3.7) e deve-se escolher a curva que apresente o valor mais baixo do ganho para todas as frequências.

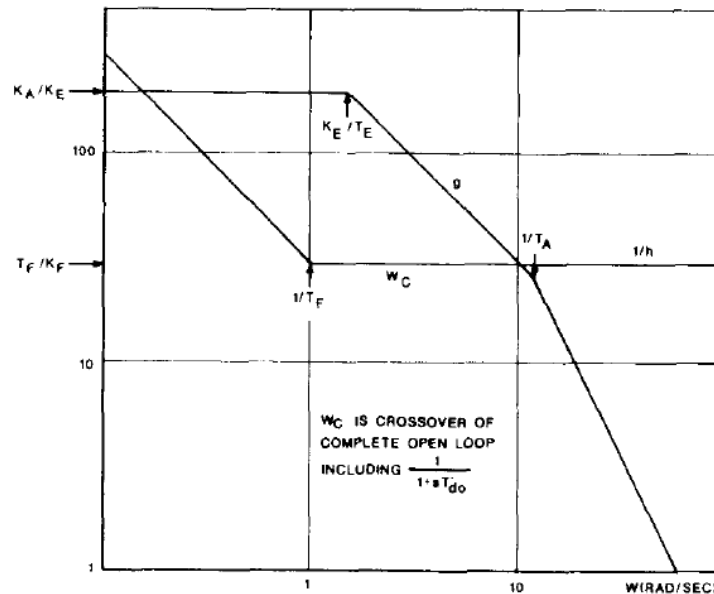



Figura 3.7 - Representação da resposta, no domínio das frequências, do sistema de controlo representado pela figura 3.6 (retirado de [4])

Na figura 3.7, a curva da malha interna do regulador "g" apresenta a resposta equivalente da função de transferência entre a frequência "0" e a primeira intersecção entre "g" e "1/h". Desde a frequência do 1º ponto de intersecção até à frequência do 2º ponto de intersecção, a função de transferência equivalente é descrita pela curva "1/h". A partir da frequência do 2º ponto de intersecção, a função de transferência equivalente é descrita pela curva "g".

A malha de realimentação será estável desde que a frequência de "crossover" esteja no ponto intermédio entre "1/Tf" e a frequência do segundo ponto de intersecção, dado que este ponto deverá corresponder ao valor mínimo de fase.

A malha interna do sistema de excitação apresenta uma estabilidade relativa quando a margem de fase de "g*h" tem um valor elevado. No entanto, outro índice importante para aferir a estabilidade da malha interna é dado quando o segundo ponto de intersecção corre para uma frequência inferior a "1/Ta".

Assim, a seguir descrevem-se as etapas do processo de melhoria do desempenho do sistema de excitação representado na figura 3.6 [4]:

1. Comparar os valores de "Ka", "Ta", "Te" e "T´do" com os valores típicos. A razão entre "Ka/Ke" deve ter um valor superior a 200. O valor de "Ke" deve ser 1 ou perto de 0. Os parâmetros "Ta" e "Te" estão associados às características do regulador automático de tensão e respectiva excitatriz. O parâmetro "T´do" deve apresentar valores entre 5 e 10s.

2. Assumindo que, a primeira intersecção entre a malha interna do regulador e a malha de realimentação ocorre para "1/Ta", significa que:

$$Log(\frac{Ka}{Ke}) - Log(\frac{Tf}{Kf}) = Log(\frac{1}{Ta}) - Log(\frac{Ke}{Te}) \quad (3.10)$$

$$\frac{Ka*Kf}{Ke*Tf} = \frac{Te}{Ta*Ke} \quad (3.11)$$

Logo, assume-se que:

$$Ka = \frac{Te*Tf}{Ta*Kf} \quad (3.12)$$

3. Assumindo os pressupostos da alínea anterior e definindo o tamanho adequado da malha de realimentação:

$$Log(\frac{1}{Ta}) - Log(\frac{1}{Tf}) = Log(5) \quad (3.13)$$

$$Tf = 5*Ta \quad (3.14)$$

4. O ponto exacto entre o ponto médio entre "1/Ta" e "1/Tf" é calculado da seguinte forma:

$$Log(\frac{1}{Tf}) + \frac{Log(1/Ta) - Log(1/Tf)}{2} = Log(Wc) \quad (3.15)$$

$$Wc = \frac{1}{(Tf*(Tf/Ta)\hat{}0{,}5)} = \frac{1}{(Ta*(5)\hat{}0{,}5)} = \frac{1}{2{,}236*Ta} \quad (3.16)$$

A intersecção da malha de realimentação ocorrerá para a frequência "wc" desde que:

$$Log(\frac{Tf}{Kf}) - Log(1) = Log(Wc) - Log(\frac{1}{T'do}) \quad (3.17)$$

$$\frac{Tf}{Kf} = Wc*T'do \quad (3.18)$$

Substituindo:

$$\frac{Tf}{Kf} = \frac{5*Ta}{Kf} = \frac{T'do}{Ta*(5)\hat{}0{,}5} \quad (3.19)$$

$$Kf = \frac{5*(5)\hat{}0{,}5*Ta\hat{}2}{T'do} = \frac{11{,}18*Ta\hat{}2}{T'do} \quad (3.20)$$

5. Se o valor de “Ka” estiver perto do valor de “(Tf*Te)/(Kf*Ta)”, com os valores de “Tf” e “Kf” calculados nos pontos 3. e 4., então usam-se estes parâmetros para melhorar o desempenho deste sistema de excitação ou uma combinação de “Tf” e “Kf”, desde que a razão de “Tf/Kf” seja mantida e o valor de “Tf” seja maior do que o calculado no ponto 3. No entanto, se “Ka” for muito maior do que “(Tf*Te)/(Kf*Ta)”, use os valores acima sugeridos para “Tf” e “Kf”. Se a resposta ao degrau for oscilatória, a única hipótese é alterar o valor de “Ka”. Este valor deve ser ajustado, se possível, para “(Tf*Te)/(Kf*Ta)”, com “Tf” e “Kf” calculados nos pontos 3. e 4. deste procedimento.

   Se o valor de “Ka” for menor do que 0,7*(Tf*Te)/(Kf*Ta), o valor da frequência da segunda intersecção deve ser menor do que “1/Ta”.

   A frequência, “W2nd”, deste segundo ponto de intersecção pode ser escolhida pela seguinte expressão:

$$W2nd = \left(\frac{2{,}236 * Ka}{T'do * Te} \right)^{\wedge}0{,}5 \qquad (3.21)$$

   Os novos valores para os parâmetros “Tf” e “Kf” podem ser calculados pelas seguintes expressões:

$$Tf = \frac{5}{W2nd}; Kf = \frac{11{,}18}{T'do * (W2nd)^{\wedge}2} \qquad (3.22)$$

   Os valores de “Tf” e “Kf” ou suas combinações, nas condições restritas acima mencionadas, podem ser usados para garantir a estabilidade do sistema de excitação.

A nível industrial, a decisão de eliminar o bloco de redução do ganho transitório não é unânime. Assim sendo, existem técnicas de melhoramento do desempenho para o modelo “DC1A”, nas quais não será eliminado o bloco de redução do ganho transitório.

As técnicas para melhorar o desempenho dos modelos de sistemas de excitação, atrás descritas, permitem-nos, não só, fazer uma melhor avaliação da caracterização dos parâmetros de um sistema de excitação estável, como também, saber de que forma o seu ajuste pode alterar a respectiva resposta, quer em frequência, quer no tempo.

3.4 Estimação dos parâmetros em sistemas de excitação

De seguida, irá ser feito o ponto de situação sobre os trabalhos realizados na área da estimação dos parâmetros de sistemas de excitação, através da recolha de dados que resultam do funcionamento do sistema de excitação ou do sistema de controlo da excitação (entradas e saídas do sistema).

A estimação dos parâmetros do sistema de excitação é utilizada para determinar os parâmetros dos componentes de um sistema de excitação, através da análise dos sinais de entrada e saída no domínio do tempo.

Na área da estimação, a maior parte dos trabalhos analisados, utilizam a ferramenta "System Identification" "SI" do Matlab para fornecer os valores de coeficientes associados aos modelos pré-definidos nesta aplicação [5] [6] [7].

A "SI" é definida pelo acto de estimação ou determinação de um modelo ou estrutura através de um conjunto limitado de sinais de entrada e de saída, medidas estas, que poderão ou não ter distribuído ruído pelas medidas. O processo pelo qual a aplicação "SI" é executada é constituído por 5 etapas. A 1ª consiste em reunir o conjunto de medições de entrada e de saída do sistema que permitam identificar o modelo. Na 2ª etapa, os dados são analisados e tratados. A própria ferramenta apresenta várias possibilidades de tratamento dos dados introduzidos. Na 3ª etapa, o modelo de estimação tem de ser escolhido. A própria aplicação fornece um conjunto de modelos de estimação. Na 4ª etapa, após ter sido escolhido o modelo ou todos os modelos disponíveis, a aplicação apresenta os resultados, sob a forma percentagem, indicando o nível de sucesso da estimação. Na última etapa, os resultados são analisados quanto à sua precisão e validade da estimação através da simulação no domínio do tempo das curvas estimada versus fornecida.

Na fase seguinte do trabalho, existem abordagens diferentes. A ideia subjacente a esta fase do processo, com vista à obtenção dos parâmetros do modelo de sistema de excitação, é igualar as funções de transferência do modelo utilizado com a do modelo de sistema de excitação pretendido.

Alguns autores implementaram algoritmos do tipo genético, outros usaram aplicação informática como o "VisSim" para adaptarem os resultados obtidos ao modelo pretendido e outros subdividiram o seu modelo em blocos individuais e calcularam, assim, os valores dos parâmetros.

No caso da divisão do modelo em blocos, foi necessário obter medições dos sinais de entrada e de saída desses mesmos blocos.

A última fase do processo para obter os parâmetros do modelo consiste em converter os parâmetros estimados da função de transferência do domínio temporal para o domínio das frequências. Este problema de conversão, caso as funções de transferência tenham sido igualadas com sucesso, pode ser realizado usando técnicas de cruzamento dos polos e zeros da função de transferência.

A título de exemplo, utilizou-se a ferramenta "SI" do Matlab para obter uma estimação para o caso de teste. O caso de teste consiste num modelo de sistema de controlo de excitação fornecido por um fabricante que será detalhado no capítulo seguinte. Na figura 3.8, é possível visualizar a curva de resposta ao aumento num degrau da tensão de referência do sistema de controlo de excitação do caso de teste (curva a cor preta) e respectivas estimações segundo os algoritmos "n4s3" (curva a cor azul) e "arxqs" (curva a cor vermelha).

Como é observável na figura 3.8, a precisão da estimação foi satisfatória, mas o grau de precisão não foi tão bom como o obtido com a aplicação “DC1Atuning” (ver figura 3.9).

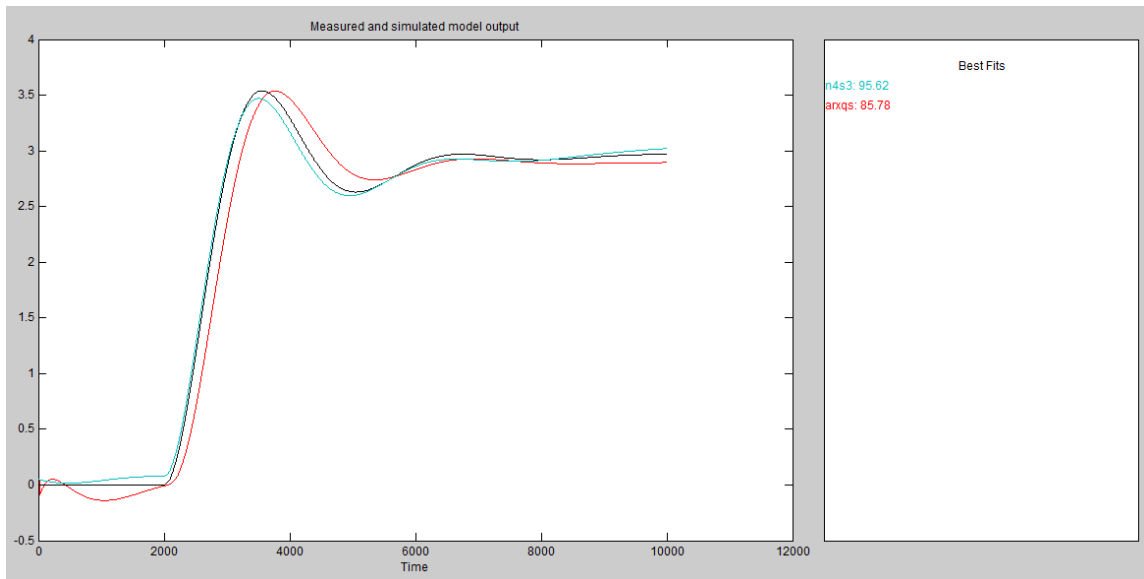



Figura 3.8 - Curva estimada segundo os modelos “n4s3” e “arxqs” para o sistema de controlo de excitação fornecido pelo fabricante na aplicação “System Identification” do Matlab

Na figura 3.9, encontra-se representada a forma da onda da tensão de referência “Vin_DC1A” (curva a cor vermelha) aplicada a ambos os modelos. A curva de resposta ao aumento num degrau da tensão de referência, “Vin_DC1A”, do sistema de controlo de excitação fornecido pelo fabricante e identificado como caso de teste está representada pela curva “Vout_SCR” (curva a cor verde).

A curva de resposta ao aumento num degrau da tensão de referência, “Vin_DC1A”, do sistema típico de controlo de excitação “DC1A”, cujos parâmetros foram ajustados pela aplicação “DC1Atuning”, está representada pela curva “Vout_DC1A” (curva a cor azul).

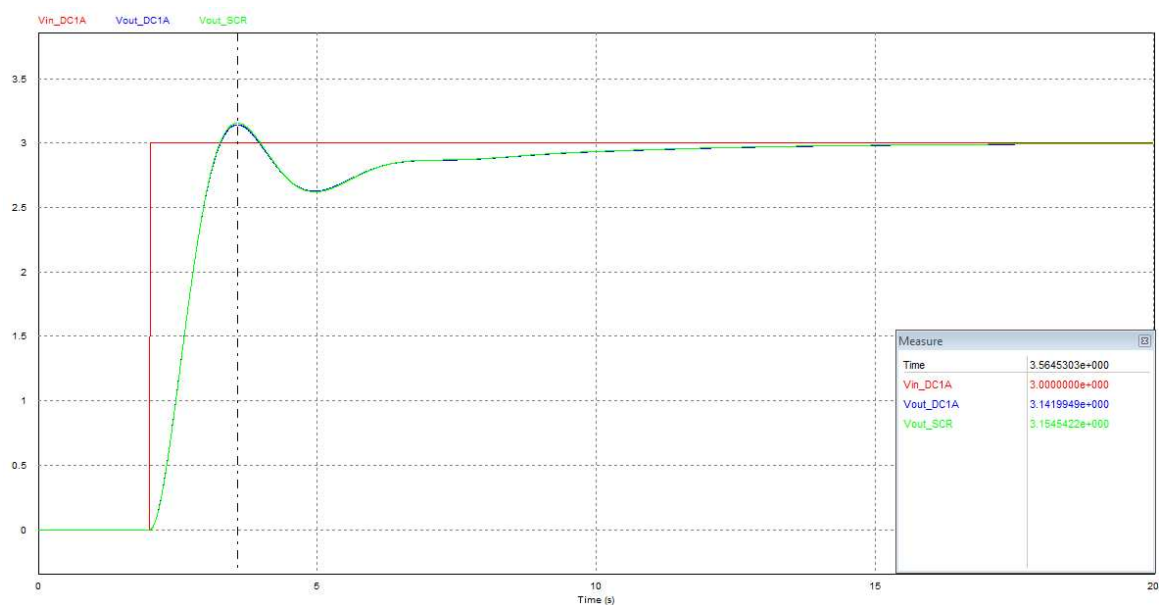



Figura 3.9 - Resultado da solução de ajuste dos parâmetros obtidos pela aplicação “DC1Atuning” para o sistema de controlo de excitação fornecido pelo fabricante

Este método de determinação dos parâmetros de um modelo tem a limitação de trabalhar apenas no domínio temporal. Não obstante da aplicação “SI” possuir um método de estimação que usa a função de transferência no domínio das frequências, mas cujo modelo é bastante limitado, como se pode constatar pela figura 3.10 seguinte, dado que a complexidade da função de transferência do modelo de estimação está restringido à possibilidade de definir, no máximo, 4 polos e 1 zero. Na figura 3.10, está disponível a janela do método de estimação que recorre à resposta no domínio das frequências para determinar o valor dos parâmetros definíveis segundo a função de transferência escolhida: “K”, “Tp1”, “Tp2”, “Tp3”, “Td” e “Tz”.

Figura 3.10 - Modelo de processo de estimação da aplicação “System Identification” do Matlab

Os resultados obtidos e a precisão deste modelo de estimação deixam muito a desejar. No entanto, se este modelo for utilizado na análise de blocos e não no modelo completo, os resultados da precisão poderão ser, consideravelmente, melhores.

As duas últimas abordagens, apresentadas neste capítulo, permitem fazer, à data, o ponto da situação dos trabalhos que têm sido desenvolvidos nesta área. Muitos destes trabalhos resultam de um processo de modernização de sistemas de excitação (melhoria do desempenho) ou de um trabalho de levantamento e identificação dos parâmetros dos sistemas de excitação montados em diferentes centrais eléctricas.

Estes resultados são importantes para a indústria porque possibilitam a redução de custos, o aumento da disponibilidade e longevidade dos equipamentos, a diminuição do tempo de paragem para manutenção desses equipamentos e a necessidade de modelizar os sistemas de excitação implementados para que se realizem estudos de estabilidade/colapso de tensão.

Capítulo 4

Metodologia desenvolvida para ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A"

4.1 Introdução

Com o intuito de construir uma aplicação que visasse minorar as diferenças entre a resposta em frequência da função de transferência fornecida e da função de transferência do modelo típico "DC1A", foram analisados diferentes métodos de aproximação de funções, sendo os baseados em polinómios os mais estudados.

Os polinómios são muito usados em matemática, especialmente no campo da análise numérica. Ao longo dos anos, os polinómios têm sido também usados na aproximação de funções. A teoria de aproximação de funções é utilizada em dois tipos de problemas:

- Tendo uma função "f" que é fornecida explicitamente, é possível através dos diferentes métodos da teoria de aproximação de funções obter uma de função polinomial "g(x)" que apresenta o mesmo comportamento espacial da função "f(x)";
- Existindo um conjunto de dados disponíveis, é possível, através dos diferentes métodos da teoria de aproximação de funções, obter uma função polinomial "g(x)" que descreve a distribuição dos dados analisados;

Os métodos de aproximação de funções mais conhecidos são os seguintes:

- Aproximação de Taylor;
- Polinómios de Lagrange;
- Aproximação pelo método dos mínimos quadrados;
- Aproximação de Hermite;

- Aproximações de Chebyshev;
- Entre outros.

A aproximação polinomial consiste em emular uma função “f(x)” ou a distribuição de um determinado conjunto de dados por uma outra função “g(x)”, escolhida entre uma classe de funções definida à priori e que satisfaça algumas propriedades. A função “g(x)” é então usada, em substituição da função “f(x)” ou da distribuição de um determinado conjunto de dados.

Um dos métodos mais eficiente para encontrar uma função polinomial através de um conjunto determinado de pontos é o método dos mínimos quadrados. Este método consiste no processo de se obter a melhor linha (recta ou curva), a qual pode ser ajustada tendo em conta o conjunto de dados fornecidos.

O método dos mínimos quadrados assume que a linha (recta ou curva) que melhor aproxima um conjunto de pares ordenados conhecidos é aquela que possuir a soma mínima dos desvios ao quadrado. Basicamente, é um procedimento que busca o mínimo de uma função de duas variáveis (os coeficientes linear e angular da linha), construída a partir da distância entre os pontos experimentais e os pontos de uma linha.

Não obstante do método dos mínimos quadrados ser o mais indicado para resolver o problema de simulação dinâmica em estudo, não é possível obter um polinómio complexo que traduza o comportamento do conjunto de pontos obtidos através da função de transferência fornecida, pelo facto do nosso problema se encontrar no domínio Complexo e não no domínio Real.

Através do estudo das ferramentas disponíveis no simulink do Matlab, encontrou-se a ferramenta “System Identification” que permite estimar ou determinar um modelo ou estrutura através de um conjunto limitado de sinais de entrada e saída.

Na figura 4.1, apresenta-se a janela despoletada quando a aplicação “SI” é inicializada no Matlab. Nesta janela é possível escolher a forma de introdução dos dados de entrada e saída do modelo no campo “Import data”, tal como definir os métodos de estimação no campo “Estimate”.

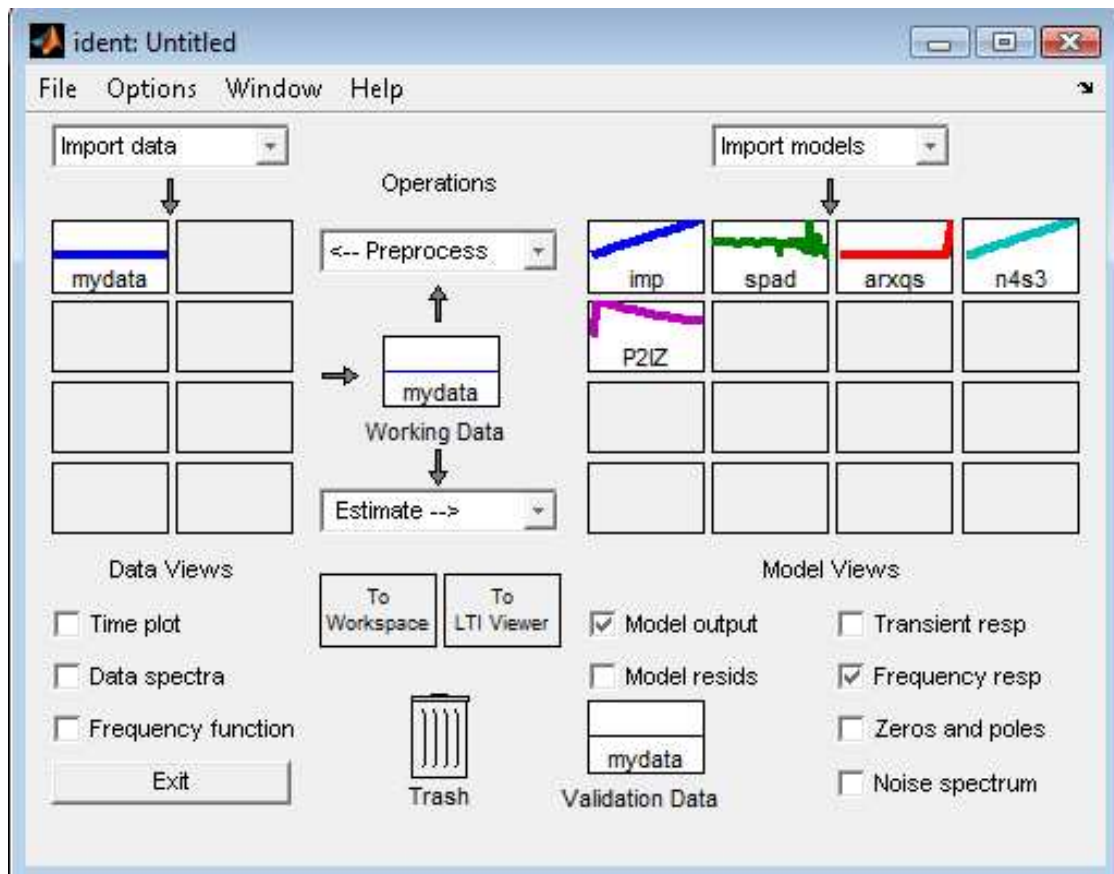



Figura 4.1 - Janela da aplicação “System Identification” do Matlab

Esta aplicação não é uma solução viável para o problema em estudo, pois apenas trabalha no domínio do tempo. A solução disponibilizada corresponde a uma função de transferência que teria de ser convertida do domínio do tempo para o domínio da frequência e, posteriormente, ajustada para poder ser equiparada à função de transferência do modelo típico do sistema de excitação “DC1A”.

A utilização da aplicação atrás referida só seria viável se o modelo de estimação apresentasse uma função de transferência idêntica à função de transferência do modelo típico “DC1A”.

Existem trabalhos realizados na área da estimação dos parâmetros de modelos de sistema de excitação com recurso a esta aplicação, embora trabalhe apenas à resposta no domínio do tempo, mas associados a algoritmos genéricos e/ou outros softwares de simulação dinâmica.

A aplicação “System Identification” “SI” tem a possibilidade de obter, de uma forma directa, os parâmetros para uma função de transferência no domínio das frequências, mas bastante limitada.

Figura 4.2 - Modelo de processo de estimação da aplicação "System Identification" do Matlab

Devido a esta limitação, existem trabalhos que utilizaram a aplicação "SI", mas subdividiram o modelo de excitação nos seus blocos constituintes. Daí mais uma razão para procurar uma solução de minimização das diferenças entre a resposta em frequência da função de transferência fornecida e da função de transferência do modelo típico "DC1A", mas que não se baseasse nas técnicas de aproximação das funções acima mencionadas ou na aplicação "SI" do Matlab.

A implementação de um algoritmo de optimização não linear baseado em técnicas de gradiente apresentou-se como um modelo mais eficaz para solucionar o problema da aproximação entre a resposta em frequência da função de transferência fornecida e da função de transferência do modelo típico de sistema de excitação "DC1A".

A programação não linear, sendo uma "ferramenta" matemática que permite encontrar a solução óptima para um certo tipo de problemas, torna-se uma alternativa de solução para o problema analisado. Ao conceber o modelo não linear para solucionar um problema deve-se ter em conta os seguintes elementos:

- Identificação das variáveis de decisão;
- Identificação da função objectivo;
- Identificação das restrições;
- Formulação matemática do problema.

Depois de se ter obtido a formulação matemática, é então possível resolver o problema de optimização.

O problema da minimização das diferenças entre a resposta em frequência da função de transferência fornecida e da função de transferência do modelo típico “DC1A” tem como variáveis de decisão os parâmetros do modelo típico “DC1A”.

A função objectivo resulta da minimização do erro quadrático médio relativo e do erro absoluto relativo da resposta em frequência entre ambas as funções de transferência, sendo aplicável a cada um dos parâmetros do modelo típico “DC1A”, individualmente e ao respectivo conjunto, constituindo uma solução possível.

O erro quadrático médio relativo, “RE(f)”, é calculado através da seguinte fórmula [8]:

$$RE(f) = \frac{MSE(f)}{MSE(\overline{y})} = \frac{\frac{1}{ne}\sum_{i=1}^{ne}\left(y_i - \hat{y}_i(f)\right)^2}{\frac{1}{ne}\sum_{i=1}^{ne}\left(y_i - \overline{y}\right)^2} \qquad (4.1)$$

onde,

- ne – número total de amostras;
- y_i – valor real da amostra;
- $\hat{y}_i(f)$ – valor estimado da amostra;
- $\overline{y}$ – valor médio amostral:

$$\overline{y} = \frac{1}{ne}\sum_{i=1}^{ne} y_i \qquad (4.2)$$

- MSE ($\overline{y}$) – desvio quadrático médio amostral;
- MSE (f) – erro quadrático médio.

O erro absoluto relativo, “Re(i)”, é calculado através da seguinte fórmula:

$$RE(i) = \frac{\left|y_i - y_{est}\right|}{y_i} \qquad (4.3)$$

Onde,

- y_i – valor real da amostra;
- y_{est} – valor estimado da amostra.

Os parâmetros do modelo típico “DC1A” terão de apresentar valores positivos, sendo esta a restrição identificada.

Desta forma, procedeu-se ao desenvolvimento de uma metodologia com base nos princípios inerentes à programação não linear para o ajuste das variáveis de decisão, recorrendo, também, a técnicas baseadas em métodos do gradiente, com o objectivo de minimizar as diferenças específicas, tendo como base as próprias sensibilidades da resposta do ajuste das variáveis de decisão.

Esta metodologia é explicada nas próximas secções do presente capítulo.

4.2 Apresentação do caso de teste

O caso de teste corresponde a um sistema de excitação de um gerador síncrono não estandardizado.

O modelo de sistema de controlo da excitação fornecido pelo fabricante encontra-se representado na figura seguinte.

Figura 4.3 - Representação do sistema de controlo de excitação fornecido pelo fabricante

Assim sendo, o modelo de sistema de excitação de teste encontra-se definido entre os pontos “Verr” e “Efd” do diagrama de blocos representado na figura 4.3.

Os parâmetros fornecidos pelo fabricante para este modelo encontram-se na tabela seguinte.

Parâmetros do regulador de tensão automático e excitatriz:	
Ta1	3
Ta11	1,3
Ta2	0,7
Ta22	0,7
Tee	0,65
Vmin	0
Vmax	3
Parâmetros do gerador de teste:	
Ke	3,8
Te	3
Se=(fe)	0,6
Parâmetro do transdutor de medida da tensão eléctrica à saída do Gerador:	
Tr	0,1

Tabela 4.1 - Parâmetros do modelo de sistema de controlo de excitação fornecido pelo fabricante

O caso de teste irá desempenhar um papel importante no processo de desenvolvimento da metodologia associada à criação da aplicação “DC1Atuning”, existindo uma versão da

aplicação "DC1Atuning" em que a introdução dos parâmetros do sistema de excitação fornecido pelo fabricante é realizada com base no modelo de sistema de excitação do caso de teste.

Existe, também, uma versão da aplicação "DC1Atuning", mais generalista, que prevê a introdução do sistema de excitação fornecido pelo fabricante com base numa função de transferência cuja estrutura é referenciada na figura 4.4.

Figura 4.4 - Representação da composição tipo da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante

4.3 Metodologia desenvolvida

A metodologia desenvolvida para o ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" centrou-se na análise do impacto do ajuste individual de cada um dos parâmetros, na resposta da função de transferência do modelo "DC1A", entre as frequências limite de 0Hz e 3Hz.

O intervalo de valores limite de frequência entre o 0Hz e os 3 Hz, em análise, resulta da variação máxima de oscilação prevista para os sistemas de excitação tipificados pelo IEEE [1].

Na ausência de métodos numéricos de cálculo do ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A", o desenvolvimento da metodologia de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" consistiu na verificação gráfica e analítica, com recurso aos diagramas de Bode e à composição da função de transferência, da resposta em frequência, do modelo típico "DC1A", ao ajuste individualizado dos parâmetros "Ka", "Tb", "Tc", "Ta", "Te", "Kf" e "Tf" (ver diagrama de blocos da figura 4.5 e função de transferência da figura 4.6).

A partir deste estudo/análise foi desenvolvido um método que permite minimizar as diferenças entre a resposta em frequência de ambos os modelos do sistema de excitação: o fornecido e o típico.

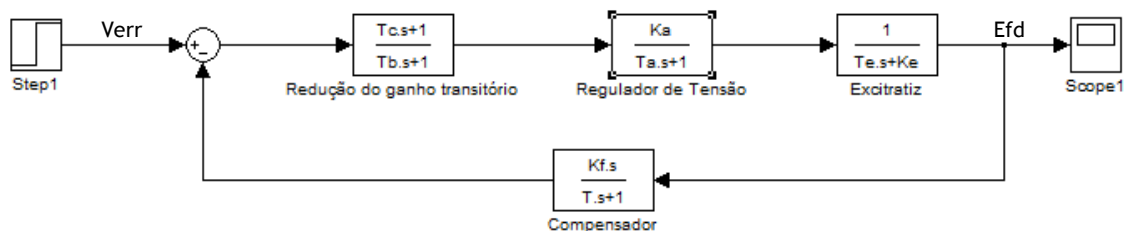



Figura 4.5 - Representação do modelo típico do sistema de excitação "DC1A"

$$(\frac{E_{FD}}{V_{ERR}} = \frac{Ka*(1+sTc)*(1+sTf)}{(1+sTb)*(1+sTa)*(Ke+sTe)*(1+sTf)+Ka*s*(1+sTc)*Kf}$$

Figura 4.6 - Representação da função de transferência do modelo típico do sistema de excitação "DC1A"

Através da análise realizada, foi possível determinar gráfica e analiticamente onde se encontravam as áreas de maior sensibilidade da resposta em frequência da função de transferência do sistema de excitação "DC1A", aquando do ajuste de um determinado parâmetro.

4.3.1 Algoritmo de ajuste dos parâmetros para uma iteração do método implementado

A análise iniciou-se com a verificação da resposta em frequência do sistema de excitação em regime permanente.

O numerador da função de transferência do modelo "DC1A" é dado por:

$$(Tc*Tf*Ka)s^2 + (Tc*Ka + Tf*Ka)s + Ka \qquad (4.4)$$

O denominador da função de transferência do modelo "DC1A" é dado por:

$$(Ta*Tb*Te*Tf)\ s^4 + (Ta*Tb*Te + Ta*Tb*Ke*Tf + Ta*Te*Tf + Tb*Te*Tf)\ s^3 + (Ta*Tb*Ke + Ta*Te + Tb*Te + Ta*Ke*Tf + Tb*Ke*Tf + Ka*Tc*Kf)\ s^2 + (Ta*Ke + Tb*Ke + Te + Ke*Tf + Ka*Kf)s + Ke \qquad (4.5)$$

Em regime permanente, pode-se verificar que, através da função de transferência desenvolvida, acima representada, no sistema de excitação "DC1A" o ganho, para "s=0", é dado por: "Ka/Ke".

Na metodologia desenvolvida, decidiu-se que o valor do parâmetro "Ke" deve ser definido pelo utilizador, visto que o parâmetro "Ke" está directamente relacionado com o tipo de excitação da excitatriz que se encontra implementada na solução técnica instalada na central eléctrica. Por omissão, o valor de "Ke" foi definido com o valor "1", ou seja, a excitatriz está equipada com excitação separada.

Assim sendo, o ajuste do valor do parâmetro "Ka" irá definir o valor do ganho em regime permanente.

A próxima fase de análise do comportamento gráfico do ajuste de parâmetros consistiu na verificação da consequência do ajuste dos parâmetros "Ta" e "Tb" na resposta em frequência da função de transferência do sistema de excitação "DC1A".

Em termos gráficos, verificou-se que o ajuste dos parâmetros "Ta" e "Tb" apresentavam comportamentos similares.

Nas figuras 4.7 e 4.8 é representada no diagrama de Bode a resposta em frequência da função de transferência do caso de teste, designada por "FTscr(jw)", com o objectivo de estabelecer uma referência nesse mesmo diagrama, permitindo mais facilmente aferir qualquer alteração na resposta em frequência das curvas afectas ao sistema de excitação "DC1A".

A figura 4.7 apresenta, também, o diagrama de Bode para a função de transferência do modelo "DC1A", com todos os parâmetros definidos com o valor "1", cuja designação é "FTDC1A(jw)".

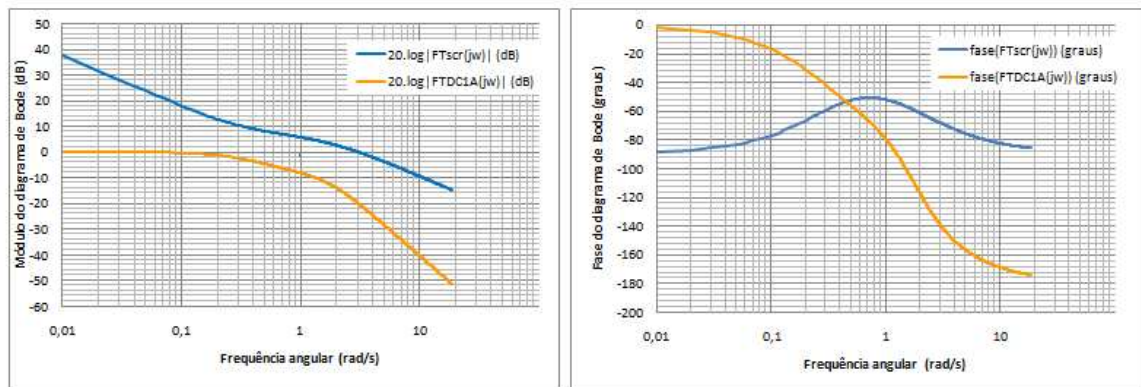



Figura 4.7 - Representação do diagrama de Bode da função de transferência do modelo "DC1A" com todos os parâmetros ajustados para valor "1"

Para o desenvolvimento da metodologia foi necessário definir os valores para a inicialização dos parâmetros do sistema de excitação "DC1A". Como tal, foi definido que o valor de inicialização dos parâmetros do modelo DC1A é "1", à excepção do parâmetro "Ke" que é definido pelo utilizador na aplicação desenvolvida.

Na figura 4.8, procedeu-se ao ajuste do valor do parâmetro "Tb" de "1" para "100" na função de transferência do modelo "DC1A", mantendo os restantes parâmetros com valor igual a "1".

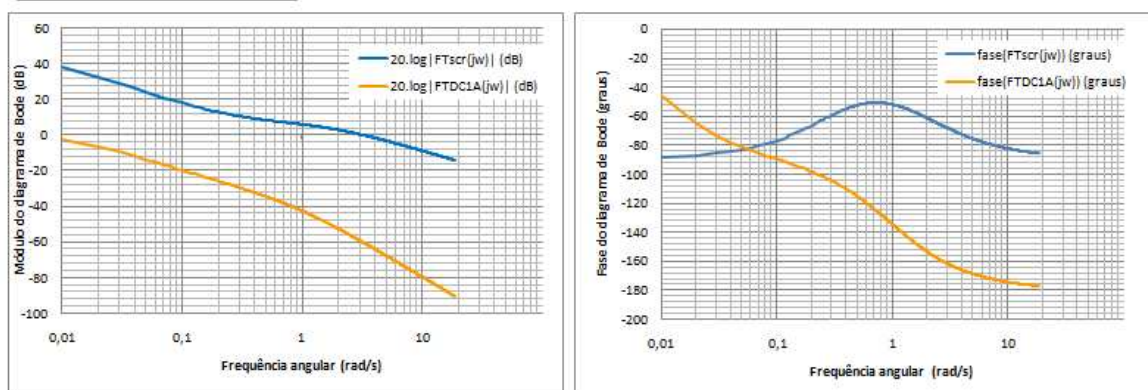



Figura 4.8 - Representação do diagrama de Bode da função de transferência do modelo "DC1A" com todos os parâmetros ajustados para valor "1" à excepção de "Tb=100"

Na figura 4.8, verifica-se através da curva de fase do diagrama de Bode que a alteração do valor do parâmetro “Tb” ou “Ta” tem como consequência a variação significativa na amplitude desta mesma curva, associada à deslocação para a direita do conjunto dos polos, como um todo, no semi-plano esquerdo em s.

Na figura 4.9, é apresenta a localização espacial dos polos e zeros da função de transferência do módelo típico com todos os parâmetros com valor “1” e com todos os parâmetros com valor “1” à excepção de “Tb=100”.

	Polos e Zeros da função de transferência do modelo típico “DC1A” com todos os parâmetros com valor “1” à excepção de “Tb=100”:	**Polos e Zeros da função de transferência do modelo típico “DC1A” com todos os parâmetros com valor “1”:**
Z1:	-0,999999989	-0,999999989
Z2:	-1,000000011	-1,000000011
P1:	-0,892032344719799+0,187334016212929i	-0,275508041
P2:	-0,892032344719799-0,187334016212929i	-2,220744085
P3:	-0,009898022	-0,751873937197378+1,03398206097597i
P4:	-1,216037289	-0,751873937197378-1,03398206097597i

Tabela 4.2 - Localização dos polos e zeros do modelo “DC1A”

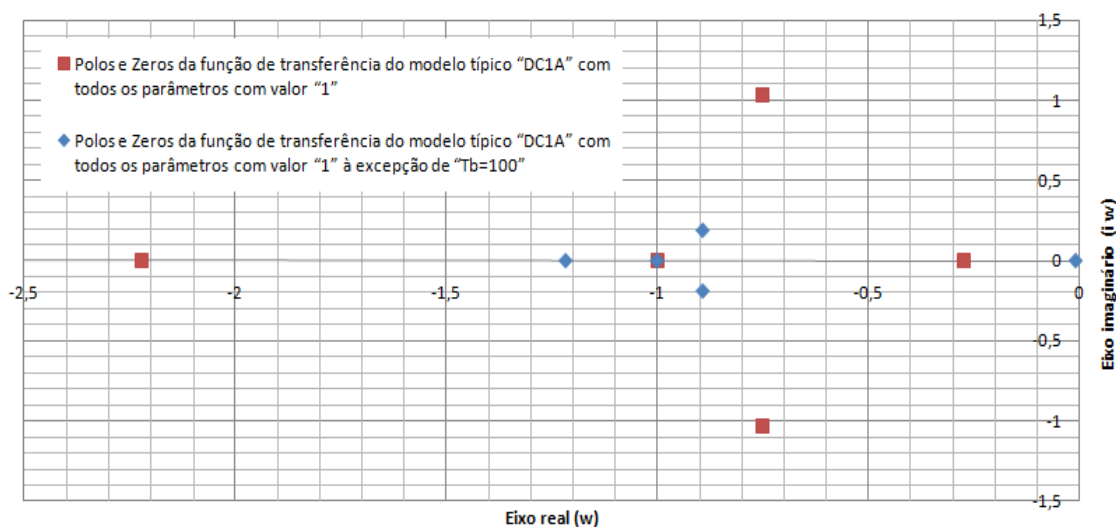



Figura 4.9 - Localização dos polos e zeros do modelo “DC1A”

Se o valor de “Ta” ou “Tb” for modificado para “0,01” em vez de “100”, o conjunto dos polos de função de transferência são deslocados para a esquerda no semi-plano esquerdo em s.

Assim sendo, os parâmetros “Ta” e “Tb” são óptimos para serem utilizados com vista a centrar/truncar a curva de fase do diagrama de Bode nas frequências limite em análise (aproximadamente 0 e 3Hz).

Desta forma, o parâmetro “Tb” é utilizado para minimizar a diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e “DC1A”), para uma frequência aproximada de “0Hz” na curva de fase do diagrama de Bode.

Para minimizar a diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e “DC1A”), para uma frequência aproximada de “0Hz” mas na curva do módulo do diagrama de Bode, é utilizado o parâmetro “Ka”, pelos motivos previamente descritos.

O parâmetro “Ta” é usado para minimizar a diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e “DC1A”), para uma frequência de 3Hz na curva de fase do diagrama de Bode.

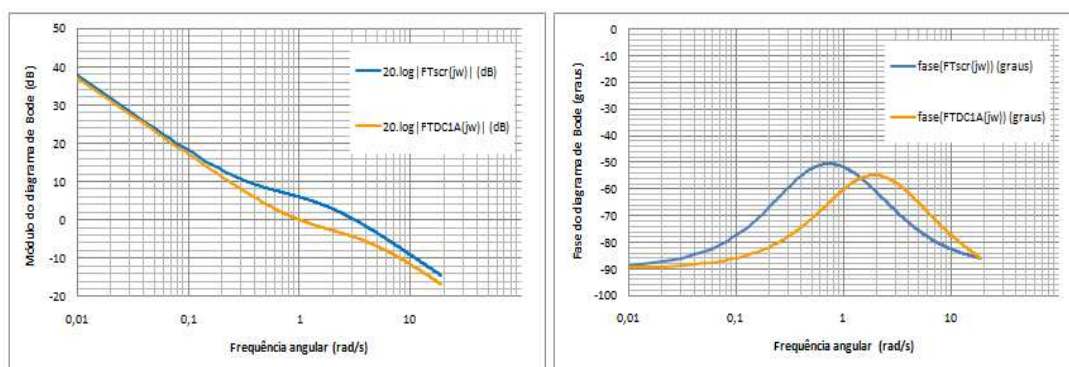



Figura 4.10 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo “DC1A” ajustados para valor “1” à excepção de “Tb”, “Ta” e “Ka”

Na figura 4.10, é possível visualizar o resultado dos ajustes dos parâmetros “Tb”, “Ka” e “Ta”, pela ordem indicada.

A curva representada com a legenda “FTdc1a(jw)” corresponde à resposta em frequência da função de transferência do modelo de sistema de excitação típico “DC1A”.

A curva representada com a legenda “FTscr(jw)” corresponde à resposta em frequência da função de transferência fornecida pelo fabricante e é objecto do nosso caso de teste.

O intervalo de frequências angulares, w= 2*PI*f, em rad/s, representado acima no gráfico, resulta das frequências limite em análise (0Hz e 3Hz).

Através do ajuste do parâmetro “Tc” consegue-se visualizar, gráfica ou analiticamente, através da respectiva função de transferência, que a sua área de influência consiste na movimentação dos zeros e, em menor importância, na movimentação de alguns dos polos no semi-plano esquerdo em s.

Assim sendo, o parâmetro “Tc”, para a frequência de 3Hz, é usado para minimizar a diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e “DC1A”) na curva do módulo do diagrama de Bode, dado que, a movimentação dos zeros, predominantemente, adicionará às operações de ajuste já realizadas, uma maior consistência e alinhamento entre a resposta em frequência de ambos os modelos.

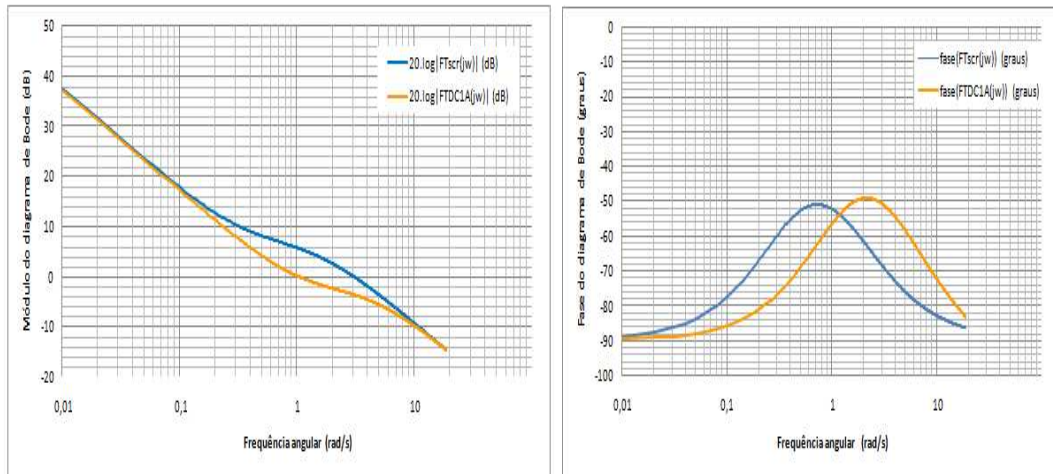



Figura 4.11 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo “DC1A” ajustados para o valor “1” à excepção de “Tb”, “Ta”, “Tc” e “Ka”

Observando a figura 4.11 e comparando com a figura 4.10, verifica-se que o ajuste do parâmetro “Tc” poderá ter como consequência a alteração da resposta, em frequência, na curva de fase do diagrama de Bode, para o intervalo de frequências perto do valor limite de 3Hz. Tal terá de acontecer pela necessidade de deslocar os zeros da função de transferência do modelo “DC1A” com o objectivo de alinhar as curvas do módulo do diagrama de Bode para essa mesma gama de frequências limite.

No entanto, o ajuste do parâmetro “Te” seguido do ajuste dos parâmetros “Ta” e “Tc” permite reduzir os inconvenientes causados pelo ajuste do parâmetro “Tc” ou até mesmo eliminá-los. As diferenças da resposta em frequência de ambos os modelos serão sempre minoradas, entre os valores limites de frequência.

Nas figuras 4.12 e 4.13, o ajuste do parâmetro “Te” desencadeia uma oscilação vertical da amplitude na resposta em frequência da função de transferência do modelo típico “DC1A”. Este comportamento pode ser comprovado analiticamente devido à presença deste parâmetro em todos os termos do polinómio do denominador da função de transferência do modelo “DC1A”, com ordem superior a “0”.

Dada esta capacidade de movimentação vertical, o parâmetro “Te” é usado para minimizar a diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e “DC1A”), para o intervalo de frequências em análise, na curva do módulo do diagrama de Bode. Neste caso, a função objectivo consiste em minimizar o erro quadrático médio relativo.

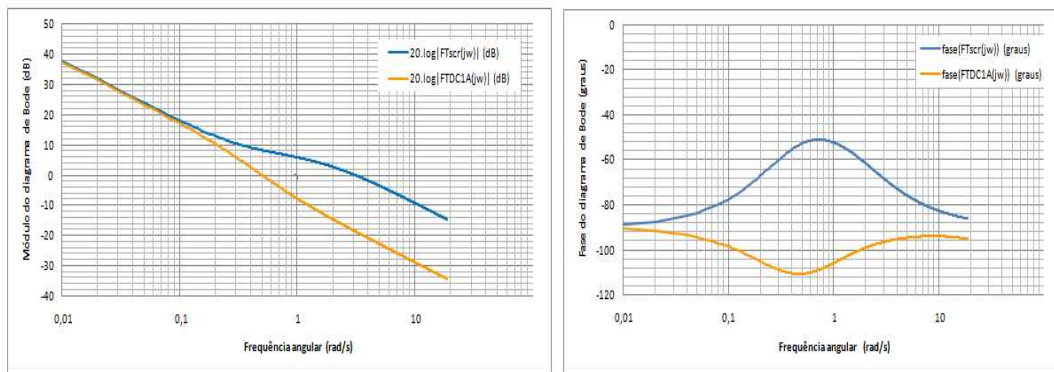



Figura 4.12 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo “DC1A” ajustados para o valor “1” à excepção de “Tb”, “Ta”, “Tc”,“Ka” e “Te=10”

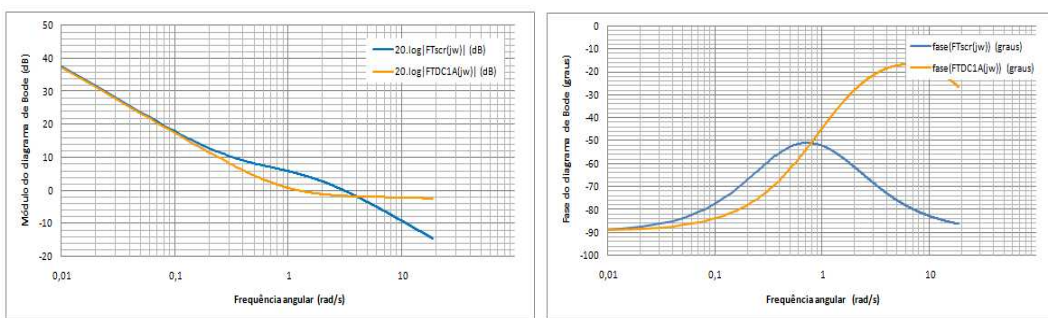



Figura 4.13 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo “DC1A” ajustados para valor “1” à excepção de “Tb”, “Ta”, “Tc”,“Ka” e “Te=0,1”

A escolha da curva do módulo do diagrama de Bode para ser alvo de minimização no ajuste do parâmetro “Te” prende-se com a menor oscilação de variação da resposta do respectivo ajuste do parâmetro nesta curva. O que permite, em termos de cálculo, reduzir a possibilidade de se encontrarem óptimos locais durante o processo de optimização do ajuste do parâmetro “Te”.

A escolha do erro quadrático médio relativo como função objectivo advém da necessidade, não só, de valorizar a minimização de diferenças com valor elevado para uma determinada gamas de frequências, como também, de valorizar a minimização de desvios à previsão de comportamento do modelo a emular.

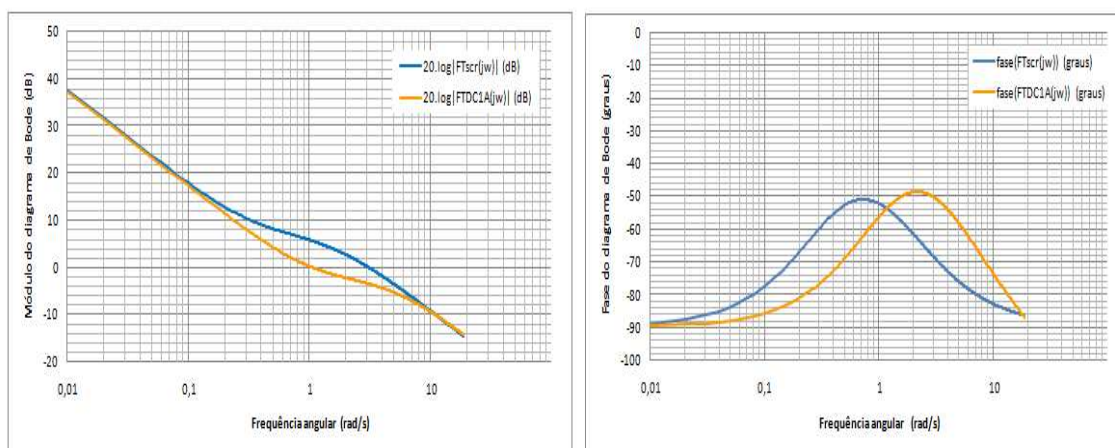



Figura 4.14 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo "DC1A" ajustados para o valor "1" à excepção de "Tb", "Ta", "Tc", "Te" e "Ka"

Após a execução consecutiva de "Te", "Ta" e "Tc", verifica-se, não só, o centramento das respostas, em frequência, de ambos os modelos (fornecido pelo fabricante e "DC1A"), para as frequências limite, como também, uma minimização da diferença entre as respostas das funções de transferência para o intervalo entre as frequências limite.

A título informativo, os parâmetros da função de transferência do modelo "DC1A" apresentam, nesta fase de execução da metodologia, os valores abaixo indicados.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	11001
Tc	1,2
Tb	4001
Ta	0,008
Te	0,8967
Ke	1
Tf	1
Kf	1

Tabela 4.3 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A"

No que concerne à melhoria do desempenho mencionada no capítulo 3, se analisarmos os valores dos parâmetros acima tabelados, usando o bloco de redução do ganho transitório, verifica-se que as condições (Tb > 10*Tc) e (Tc > 10*Ta), descritas nesse mesmo capítulo, são válidas para os valores obtidos nesta fase de execução da metodologia desenvolvida.

A localização dos polos e zeros da função de transferência do modelo "DC1A", para os valores dos parâmetros acima referenciados, é indicada na tabela seguinte.

Polos e Zeros da função de transferência do modelo "DC1A" com todos os parâmetros com valor "1" à excepção de "Tb", "Ta", "Tc", "Te" e "Ka":	
Z1:	-0,833333333
Z2:	-1
P1:	-5,08809631
P2:	-121,5201418
P3:	-6,66555E-05
P4:	-0,845385569

Tabela 4.4 - Localização dos polos e zeros da função de transferência do modelo "DC1A"

Na verificação do comportamento gráfico e analítico da resposta da função de transferência ao ajuste do parâmetro "Tf", constata-se que o ajuste do parâmetro "Tf" resulta, na curva de fase do diagrama de Bode associado ao modelo típico "DC1A", num movimento de translação da curva sobre o eixo das frequências.

Na figura seguinte, é possível verificar a consequência do ajuste do parâmetro "Tf" de "1" para "10".

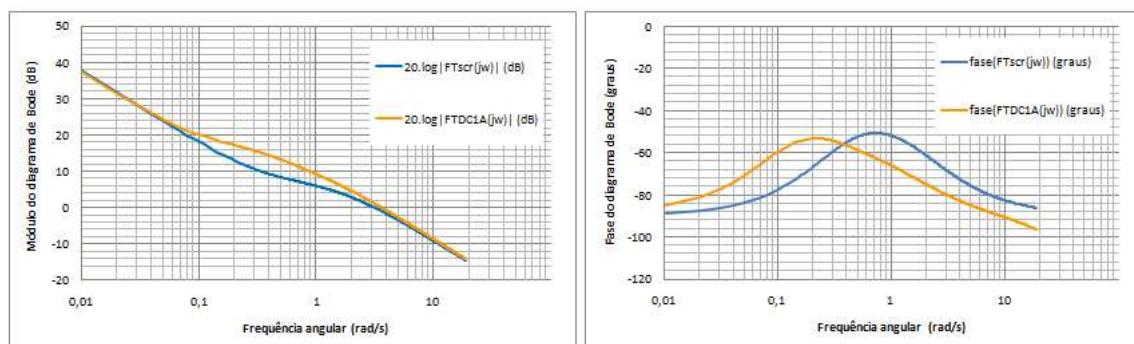



Figura 4.15 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo "DC1A" ajustados para o valor "1" à excepção de "Tb", "Ta", "Tc", "Te", "Ka" e "Tf=10"

Desta forma, é feito o ajuste do parâmetro "Tf" para minimizar a diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e "DC1A"), para o intervalo de frequências em análise na curva de fase do diagrama de Bode. Neste caso, a função de minimização das diferenças consiste na minimização do somatório dos erros absolutos relativos no intervalo de frequências em análise para as funções de transferência (fornecida e "DC1A).

A escolha da curva de fase do diagrama de Bode, para o ajuste do parâmetro "Tf", está relacionada com a própria função do bloco compensador/estabilizador de pequenos sinais no modelo "DC1A". O ajuste dos parâmetros do bloco de compensação permite minimizar os desvios de fase introduzidos pelos atrasos nos diversos elementos do sistema de excitação, logo a minimização de diferenças da resposta das funções de transferência (fornecida e "DC1A") será, obrigatoriamente, realizada na curva de fase do diagrama de Bode.

A escolha da minimização do somatório dos erros absolutos relativos como função objectivo para o ajuste do parâmetro “Tf” adveio da necessidade de valorizar a sobreposição das curvas em vez de valorizar a minimização de diferenças com valor elevado. No entanto, esta função objectivo tem, como consequência, valorizar diferenças de grandezas maiores para frequências cujas curvas apresentam valores com menor amplitude.

Na figura 4.16 é possível verificar o resultado do ajuste de “Tf”, proposto na metodologia desenvolvida.

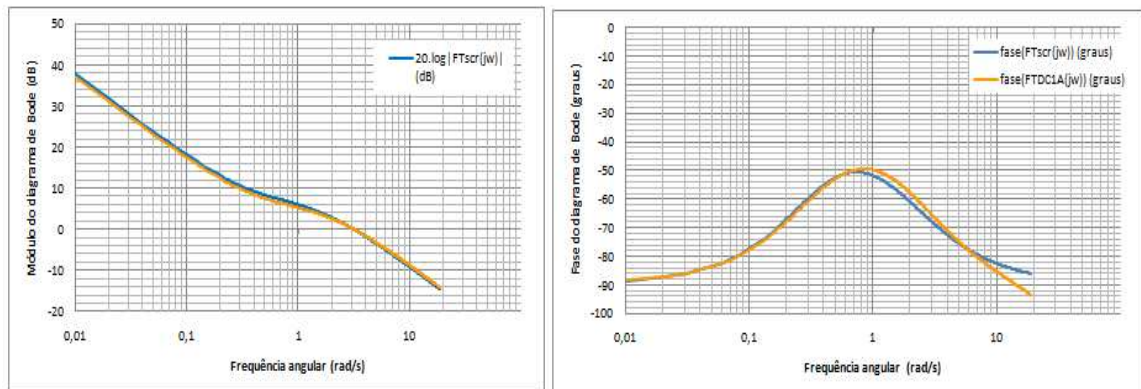



Figura 4.16 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com todos os parâmetros do modelo “DC1A” ajustados para o valor “1” à excepção de “Tb”, “Ta”, “Tc”, ”Te”, “Ka” e “Tf”

Caso o processo de ajuste do parâmetro “Tf” resulte num aumento significativo da diferença entre as curvas de módulo do diagrama de Bode, para a frequência de 3Hz, a metodologia desenvolvida prevê que o parâmetro “Tc” possa ser de forma automática, se necessário, novamente ajustado.

O processo de ajuste do parâmetro “Kf” é em todo idêntico ao parâmetro “Tf”. No entanto, a consequência do ajuste do parâmetro “Kf” resulta numa variação significativa da amplitude, oscilação vertical, em ambas as curvas do diagrama de Bode, observável nas figuras 4.17 e 4.18.

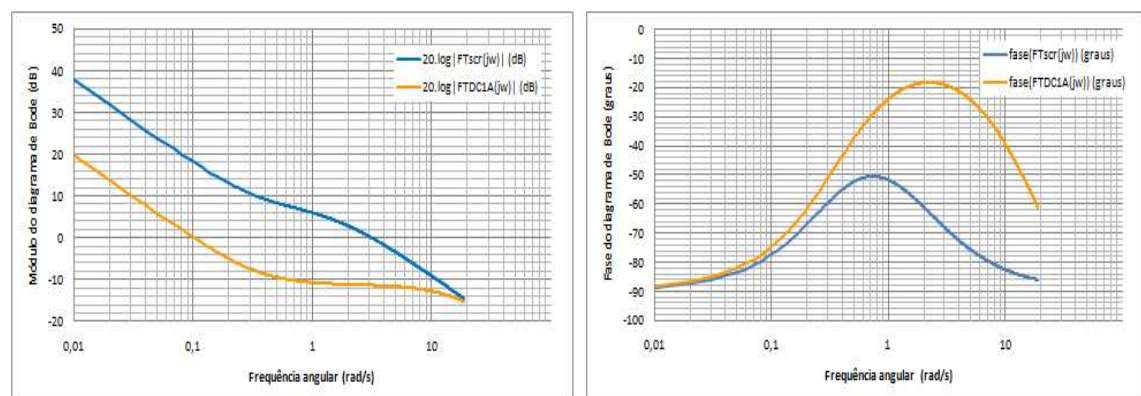



Figura 4.17 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com os parâmetros “Tb”, “Ta”, “Tc”, ”Te”, “Ka” e “Tf” do modelo “DC1A” definidos pela metodologia desenvolvida e “Kf=10”

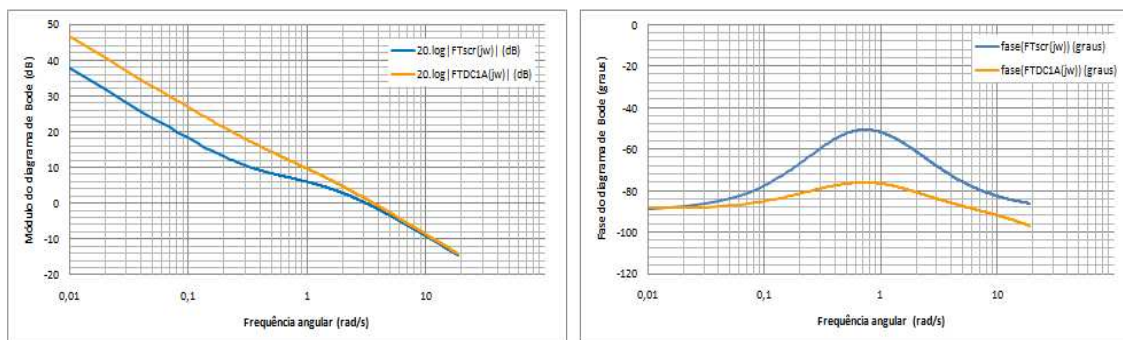



Figura 4.18 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com os parâmetros "Tb", "Ta", "Tc", "Te", "Ka" e "Tf" do modelo "DC1A" definidos pela metodologia desenvolvida e "Kf=0,1"

Por este motivo, após execução do ajuste do parâmetro "Kf" é, novamente, realizado o ajuste do parâmetro "Tf". Desta forma, é possível deslocar a curva do modelo "DC1A" em ambos os eixos (eixo das frequências e eixo da amplitude do módulo ou eixo da amplitude da fase), tendo como direcção a solução que apresente o menor valor de somatório para os erros absolutos relativos na curva de fase do diagrama de Bode.

O resultado obtido após ajuste do parâmetro "Kf", apresenta-se na figura 4.19.

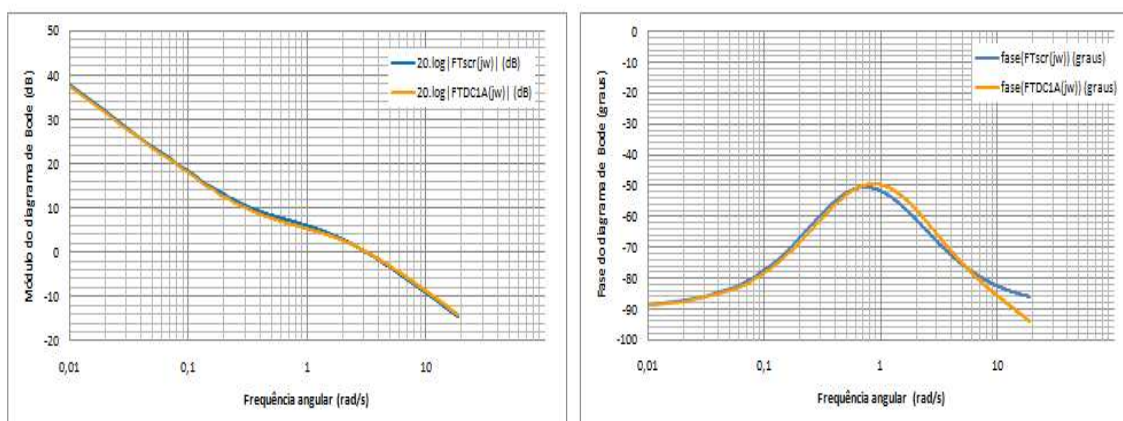



Figura 4.19 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, após uma iteração de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A"

4.3.2 Critério de paragem

Toda a metodologia apresentada faz parte da aplicação desenvolvida e designada por "DC1Atuning". Esta aplicação é inicializada com a atribuição do valor "1" a todos os parâmetros do modelo típico "DC1A" à excepção do parâmetro "Ke", o qual é definido pelo utilizador da aplicação.

A aplicação irá repetir a metodologia acima descrita até se atingir ou o número máximo de iterações definidas pelo utilizador na aplicação ou o valor do erro quadrático médio

relativo, entre a diferença de resposta em frequência das funções de transferência, ser inferior ao valor definido pelo utilizador na aplicação.

No entanto, os ajustes de parâmetros que cumprem os pressupostos atrás referenciados não terão de ser recalculados.

Na aplicação "DC1Atuning", o utilizador pode escolher a forma de determinar o critério de sucesso ou paragem do processo iterativo de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A". Esta escolha é feita aquando da selecção da macro associada à execução da aplicação "DC1Atunig", existindo duas macros disponíveis:

- Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir do módulo do diagrama de Bode;
- Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir da fase do diagrama de Bode.

As macros "Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir do módulo do diagrama de Bode" e "Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir da fase do diagrama de Bode" utilizam o erro quadrático médio relativo das curvas do módulo ou das curvas de fase do diagrama de Bode, respectivamente, como critério de paragem dos processo iterativos definidos na execução da metodologia associada à aplicação "DC1Atuning".

Em anexo, é possível visualizar o fluxograma da aplicação "DC1Atuning", no qual se encontram descritos os critérios individuais de paragem para determinação do valor dos parâmetros do modelo "DC1A".

4.3.3 Rotina de ajuste fino implementada

Para melhorar o desempenho da resposta em frequência da solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A", foi adicionada uma nova rotina que prevê a execução do ajuste dos parâmetros "Tf" e "Kf", mas usando uma nova função objectivo. A função objectivo do ajuste dos parâmetros "Tf" e "Kf" passou a visar a minimização da diferença entre a resposta das funções de transferência (fornecida e "DC1A"), para a frequência aproximada de 0Hz, nas curvas de fase e de módulo, do diagrama de Bode.

Nesta nova rotina, a execução do ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" foi definida pela seguinte ordem:

- Ajuste de "Tf" com função objectivo de minimizar, na curva de fase do diagrama de Bode, a diferença entre a resposta das funções de transferência, para uma frequência aproximada de 0Hz;
- Ajuste de "Kf" com função objectivo de minimizar, na curva do módulo do diagrama de Bode, a diferença entre a resposta das funções de transferência, para uma frequência aproximada de 0Hz;

- Ajuste de “Tf” com função objectivo definida na rotina anterior;
- Ajuste de “Kf” com função objectivo definida na rotina anterior;

Esta rotina, apesar de ser apenas um ajuste fino, irá repetir a execução do ajuste dos parâmetros “Tf” e “Kf”, acima referidos, até ser atingido o número máximo de iterações, definidas pelo utilizador na aplicação ou o valor do erro quádrico médio relativo entre a diferença de resposta, em frequência, das funções de transferência seja inferior ao valor definido pelo utilizador na aplicação “DC1Atuning”.

Com este ajuste fino pretende-se melhorar a resposta em frequência para valores próximos de “s=0”.

No entanto, o algoritmo foi implementado para que a solução, cuja diferença entre a resposta em frequência de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A”, apresente o menor valor de erro quadrático médio relativo e a mesma seja disponibilizada ao utilizador. Isto permite rejeitar soluções que poderiam ser apenas óptimos locais e não a solução óptima absoluta.

4.3.4 Método usado para encontrar o valor dos parâmetros através da minimização do erro

Adicionalmente, informa-se que o ajuste do valor dos parâmetros segue um método do gradiente adaptado. Por exemplo, o valor de “Ta” é inicializado a 1. Ao ser chamada a rotina de ajuste do parâmetro “Ta”, este valor é incrementado para 101 e o valor do erro aumenta, logo, o parâmetro “Ta” terá de voltar ao valor 1. De seguida, o valor de “Ta” é incrementado para -99, mas dado que os parâmetros não podem ter valores negativos, este valor volta a ser incrementado para 1. Posteriormente, o valor de “Ta” é incrementado para 11, com a consequente diminuição do valor do erro. Dado este resultado, valor de “Ta” é incrementado para 21. Se o valor do erro subir, então o valor do parâmetro “Ta” retorna a 11 e é decrementado para 1 (11-10). Se o erro aumentar, o valor de “Ta” volta a 11. De seguida, o valor de “Ta” foi incrementado para 12 e o valor do erro aumentou, então o valor de “Ta” é ajustado para 10 (11-1) após retornar a 11. Se o erro diminuir, o valor de “Ta” é ajustado para 9 e assim sucessivamente…

No fluxograma e no Manual da aplicação “DC1Atuning”, ambos em anexo, é possível identificar a função de minimização individual para determinação do valor de cada um dos parâmetros do modelo “DC1A”.

4.3.5 Resultado final para o caso de teste em análise

Para o modelo de excitação fornecido pelo fabricante, no caso de teste, a aplicação “DC1Atuning” forneceu a solução apresentada na figura 4.20 e nas tabelas 4.5 e 4.6 utilizando a macro “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir da fase do diagrama de Bode”.

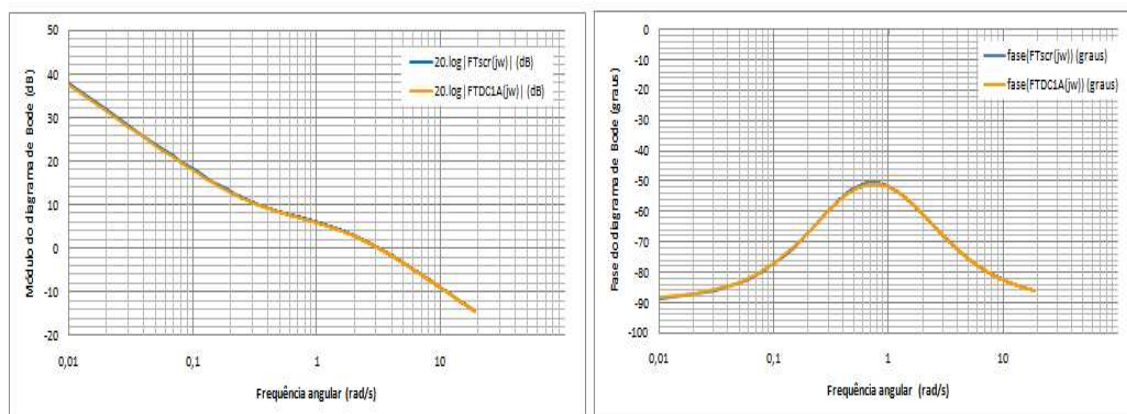



Figura 4.20 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A”

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	11001
Tc	1,2
Tb	4001
Ta	0,0001
Te	0,93
Ke	1
Tf	3,1401
Kf	0,9467

Tabela 4.5 - Solução final de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A”

Polos e Zeros da função de transferência do modelo típico:	
Z1:	-0,318461196
Z2:	-0,833333333
P1:	-1,763733342
P2:	-9999,022925
P3:	-6,72396E-05
P4:	-0,699701774

Tabela 4.6 - Solução final da localização dos polos e zeros do modelo “DC1A”

Em anexo, é fornecido o manual de utilização da aplicação “DC1Atuning”.

Utilizando o software “PSIM”, procedeu-se à simulação da resposta dos sistemas de excitação em análise.

Na figura 4.21 é possível visualizar as respostas ao aumento num degrau da tensão de referência, “Vin_DC1A”, no sistema de controlo de excitação fornecido pelo fornecedor “Vout_scr” e no sistema de controlo de excitação “DC1A” “Vout_DC1A”, com os parâmetros obtidos através da aplicação “DC1Atuning”.

Os parâmetros do transdutor de tensão e do gerador são idênticos em ambos modelos e correspondem aos fornecidos no caso de teste.

O sinal de entrada, “Vin_DC1A”, é igual para ambos os modelos.

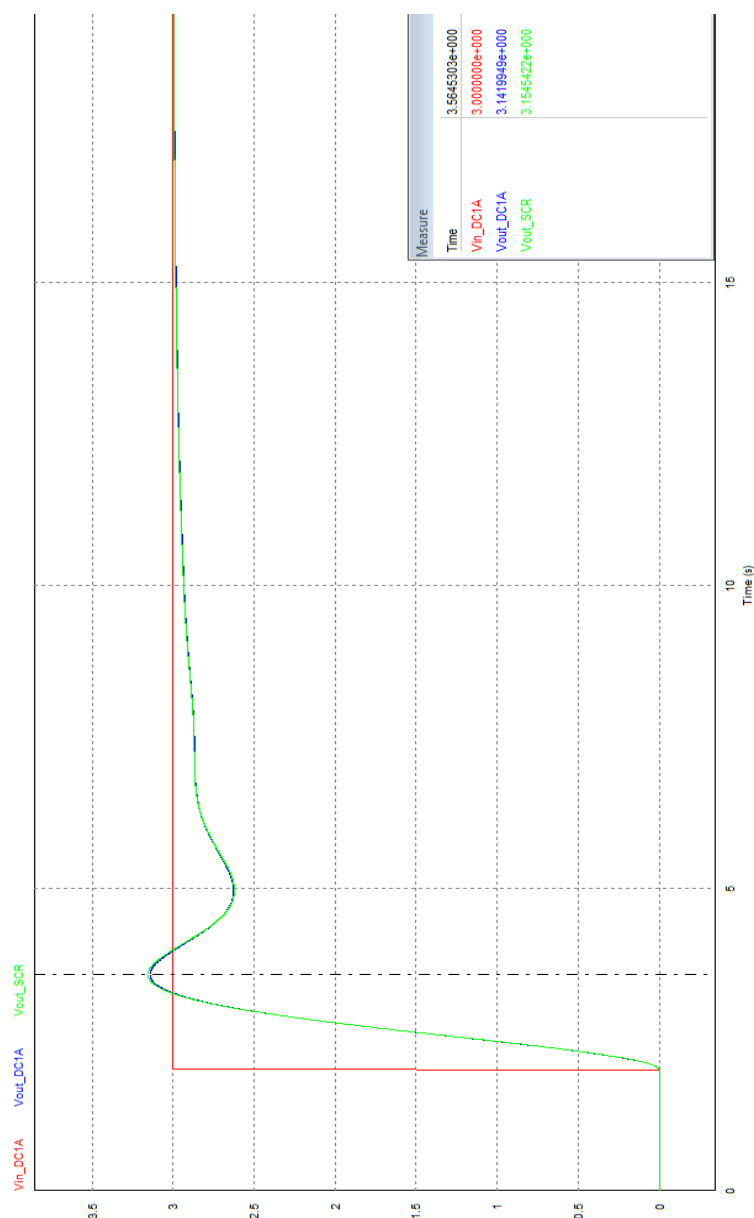



Figura 4.21 - Representação da resposta ao degrau do modelo “DC1A” e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” obtidos pela aplicação “DC1Atuning”

Como é possível observar, a aplicação “DC1Atuning”, para o caso de teste, forneceu uma solução que recorrendo à resposta, quer no domínio do tempo, quer no domínio das frequências, apresenta comportamento muito idêntico.

Capítulo 5

Avaliação de desempenho da metodologia desenvolvida

5.1 Introdução

Neste capítulo irá ser feita a avaliação do desempenho da metodologia desenvolvida através da análise de casos de estudo.

Nomeadamente, na secção 5.2, são apresentados sete casos de estudo cujos resultados de ajuste dos valores dos parâmetros para o modelo “DC1A”, fornecidos pela aplicação “DC1Atuning”, são utilizados para simular quer a resposta em frequência, quer a resposta temporal ao aumento num degrau da tensão de referência. O objectivo dos casos de estudo apresentados é verificar o comportamento da aplicação “DC1Atuning” relativamente a diferentes tipos de resposta ao aumento num degrau da tensão de referência do sistema de controlo de excitação.

Posteriormente na secção 5.3, é feita uma análise aos resultados das simulações e, também, são mencionadas possíveis limitações de utilização da aplicação.

Nesta mesma secção, são feitas advertências quando à necessidade de definir com alguma tolerância os critérios de qualidade disponíveis na aplicação “DC1Atuning”

5.2 Resultados obtidos para diversos casos de estudo

No processo de validação da aplicação foram emulados diferentes sistemas de excitação, ora recorrendo ao modelo do caso de teste, ora recorrendo à função de transferência equivalente geral de um sistema para o qual se pretende determinar o ajuste dos parâmetros

para o modelo “DC1A”. Estas emulações são mostradas abaixo e pretendem representar diferentes tipos de resposta ao aumento num degrau da tensão de referência do sistema de controlo de excitação. Nos casos em estudo, todas as simulações associadas à representação da resposta ao aumento num degrau da tensão de referência do sistema de controlo de excitação utilizam os parâmetros do transdutor de tensão e do gerador do caso de teste.

- **Caso 1**

Com os parâmetros indicados na tabela 5.1, associados ao modelo fornecido pelo fabricante (figura 4.3), procedeu-se à respectiva emulação.

Parâmetros do modelo fornecido:	
Ta1	1
Ta11	0,9
Ta2	0,7
Ta22	1,3
Tee	1

Tabela 5.1 - Valores dos parâmetros do modelo de sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 1)

Através da aplicação “DC1Atuning”, foi possível obter os resultados a seguir apresentados na tabela 5.2.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	27001
Tc	0,7
Tb	20001
Ta	0,0007
Te	1,5645
Ke	1
Tf	4,0052
Kf	0,1533

Tabela 5.2 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação “DC1A” (caso 1)

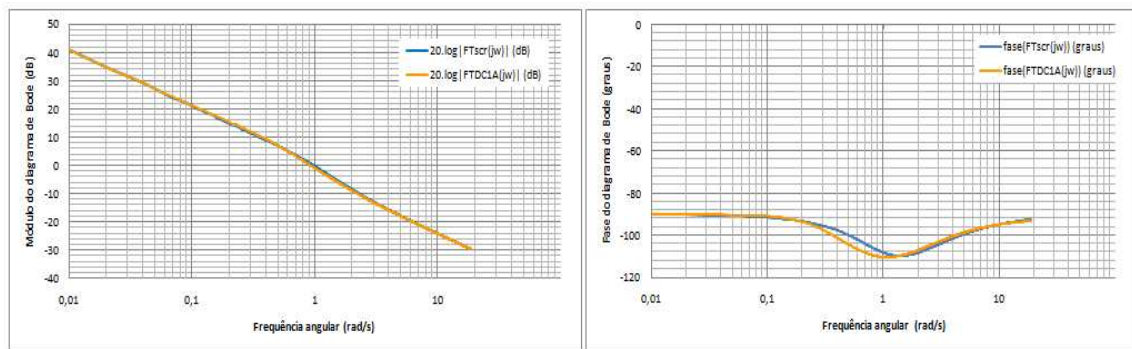



Figura 5.1 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" (caso 1)

Nas curvas do módulo do diagrama de Bode que se apresentam na figura 5.1, verifica-se que a resposta em frequência dos sistemas de excitação, fornecido e típico, não apresenta diferenças significativas. No entanto, nas curvas de fase do diagrama de bode verifica-se que a resposta em frequência dos sistemas de excitação, fornecido e típico, não estão totalmente em sincronismo, para o intervalo de frequências angulares entre os 0,2 e os 1,5 rad/s.

Na figura 5.2 é possível visualizar as respostas ao aumento num degrau da tensão de referência, "Vin_SCR", quer no sistema de controlo de excitação fornecido pelo fornecedor "Vout_scr", quer no sistema de controlo de excitação "DC1A" "Vout_DC1A", tendo os parâmetros sido obtidos através da aplicação "DC1Atuning". Nesta representação é visível o referido efeito de dessincronismo.

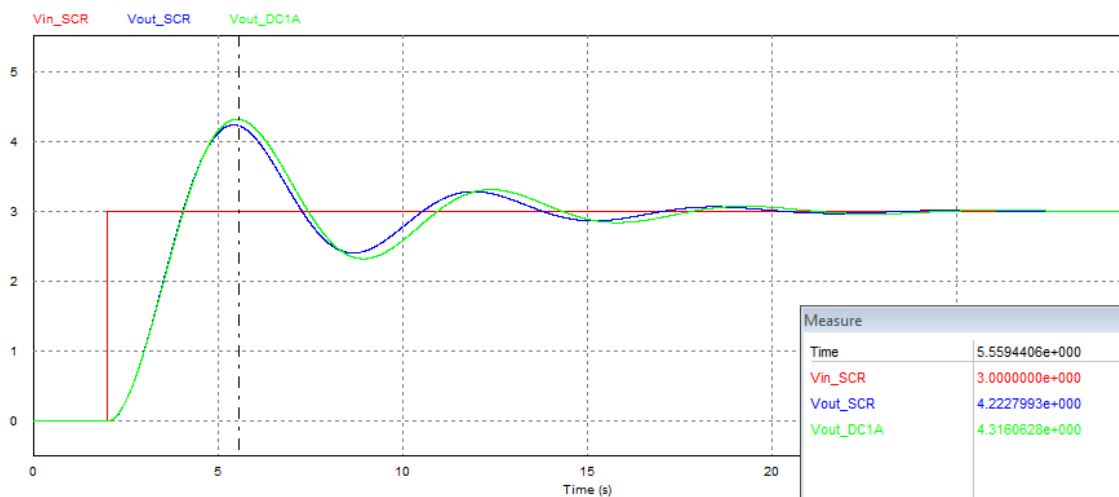



Figura 5.2 - Representação da resposta ao degrau do modelo "DC1A" e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" obtidos pela aplicação "DC1Atuning" (caso 1)

- **Caso 2**

Neste caso de estudo, introduziu-se os parâmetros indicados na tabela 5.3, associado ao modelo fornecido pelo fabricante, na aplicação "DC1Atuning".

Parâmetros do modelo fornecido:	
Ta1	3
Ta11	1,3
Ta2	1,3
Ta22	1,3
Tee	0,65

Tabela 5.3 - Valores dos parâmetros do modelo de sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 2)

Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 5.4, figura 5.3 e figura 5.4.

A aplicação “DC1Atuning” forneceu uma solução de ajuste dos parâmetros do modelo típico “DC1A” que, nas curvas de fase do diagrama de Bode, apresenta uma ligeira diferença na resposta em frequência dos sistemas de excitação, fornecido e típico, para o intervalo de frequências angulares compreendido entre os 0,05 e os 0,5 rad/s.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	18001
Tc	0,9
Tb	5001
Ta	1E-04
Te	0,9137
Ke	1
Tf	1,7067
Kf	0,9564

Tabela 5.4 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação “DC1A” (caso 2)

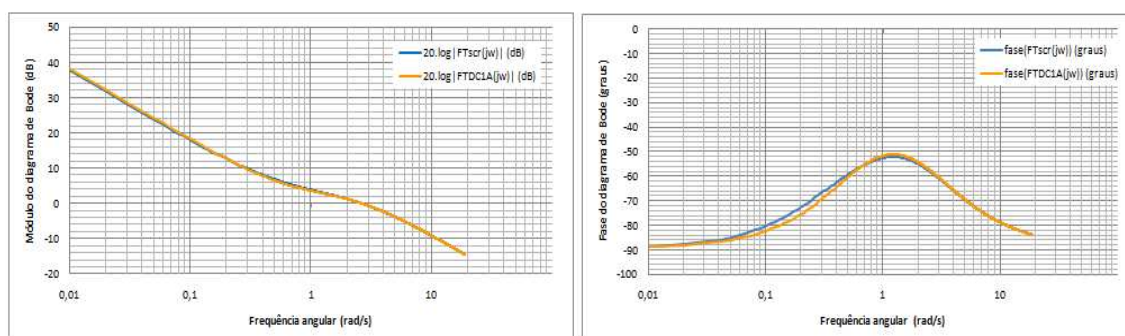



Figura 5.3 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” (caso 2)

Relativamente à resposta ao aumento num degrau da tensão de referência dos sistemas de controlo de excitação, fornecido e típico, verifica-se através das diferenças acima assinaladas que, praticamente, não existiram repercussões.

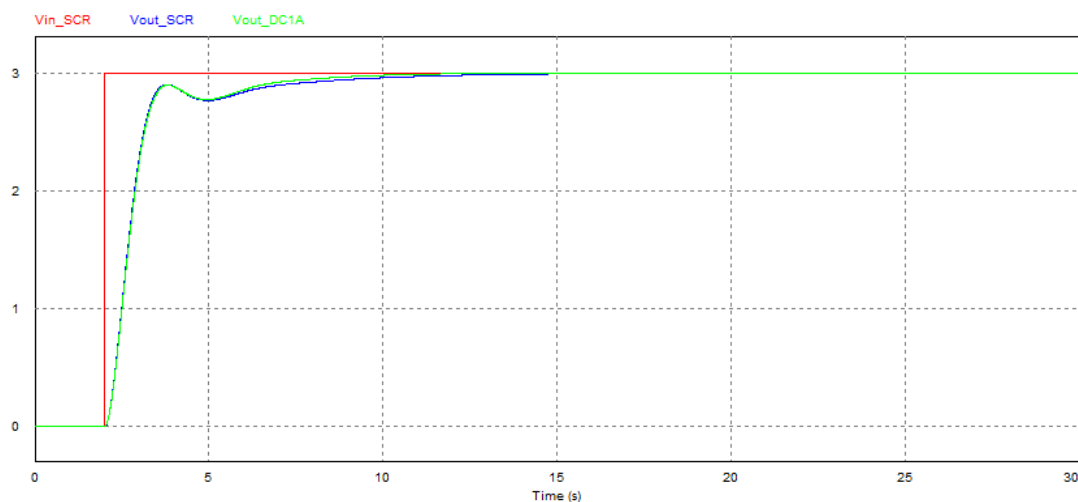



Figura 5.4 - Representação da resposta ao degrau do modelo “DC1A” e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” obtidos pela aplicação “DC1Atuning” (caso 2)

- **Caso 3**

Num 3º caso de estudo, para os parâmetros do modelo fornecido pelo fabricante, foram usados os valores apresentados na tabela seguinte.

Parâmetros do modelo fornecido:	
Ta1	8
Ta11	3
Ta2	1,3
Ta22	0,7
Tee	0,9

Tabela 5.5 - Valores dos parâmetros do modelo de sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 3)

A solução de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A”, fornecida pela aplicação “DC1Atuning”, encontra-se a seguir tabelada.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	100001
Tc	10
Tb	211112,111
Ta	1E-05
Te	0,8627
Ke	1
Tf	4,1287
Kf	0,9068

Tabela 5.6 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação “DC1A” (caso 3)

O resultado do ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” é visível nas figuras 5.5 e 5.6 a seguir representadas.

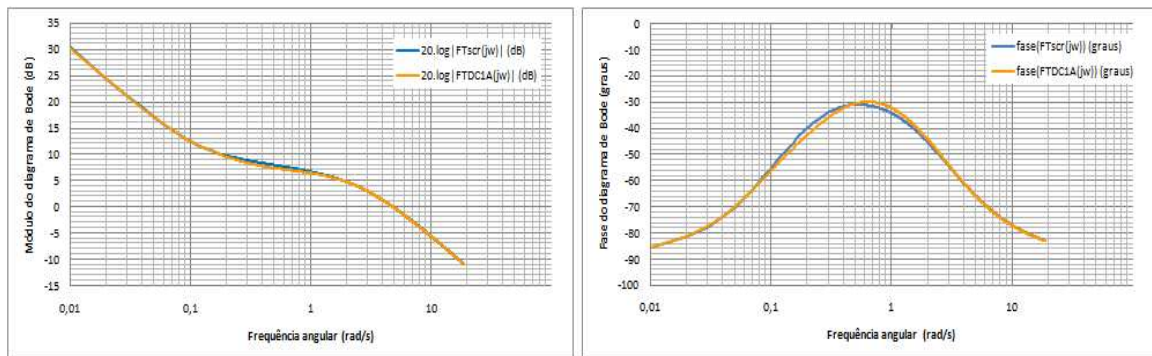



Figura 5.5 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” (caso 3)

Na figura 5.5, visualizam-se, através das curvas de fase dos diagramas de Bode, pequenas diferenças na resposta em frequência, mas a resposta no domínio dos tempos não apresenta variações significativas.

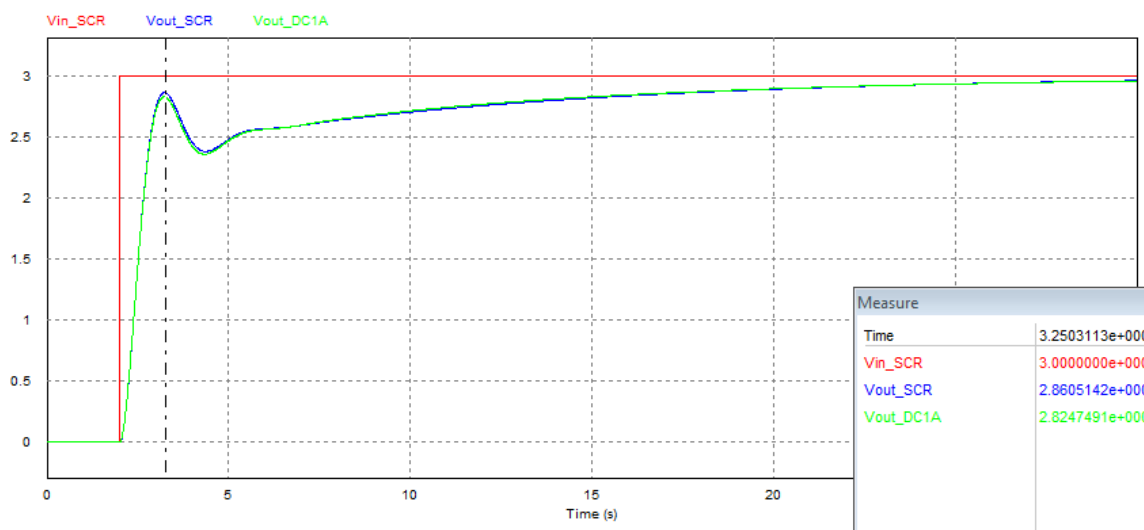



Figura 5.6 - Representação da resposta ao degrau do modelo “DC1A” e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” obtidos pela aplicação “DC1Atuning” (caso 3)

- **Caso 4**

Recorrendo à modelação do sistema de excitação através da respectiva função de transferência, na figura 5.7 é apresentada a respectiva composição, definida na aplicação “DC1Atuning”, para o sistema de excitação fornecido pelo fabricante.

Figura 5.7 - Representação da composição tipo da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante

Desta forma, procedeu-se à emulação da função de transferência fornecida pelo fabricante, constituída pelos coeficientes abaixo tabelados.

Parâmetros do modelo fornecido:	
a	0
b	0,5915
c	3
d	2,3
e	0
f	0
g	0,1
h	2
i	1

Tabela 5.7 - Valores dos coeficientes da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 4)

A solução de ajuste dos parâmetros do modelo típico “DC1A” encontra-se na tabela 5.8.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	211112,111
Tc	0,06
Tb	211112,111
Ta	1,47793E-12
Te	0,3259
Ke	1
Tf	0,5995
Kf	0,9658

Tabela 5.8 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação “DC1A” (caso 4)

Na figura 5.8 é possível observar-se algumas diferenças de resposta em frequência nas curvas de fase do diagrama de Bode, apesar do bom comportamento da resposta em frequência na curva do módulo nesse mesmo diagrama.

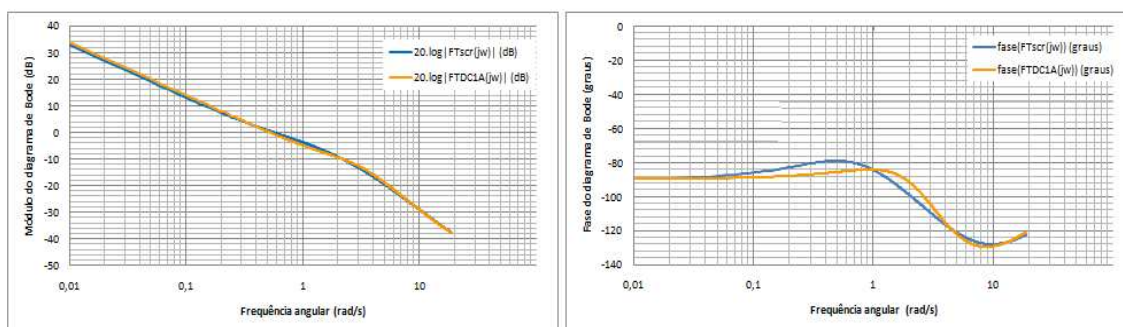



Figura 5.8 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" (caso 4)

Como é possível observar na figura 5.9, as diferenças, acima comentadas, resultaram numa variação moderada entre a resposta no domínio dos tempos de ambos os sistemas, especialmente, no que se refere ao amortecimento e à sobre-elongação.

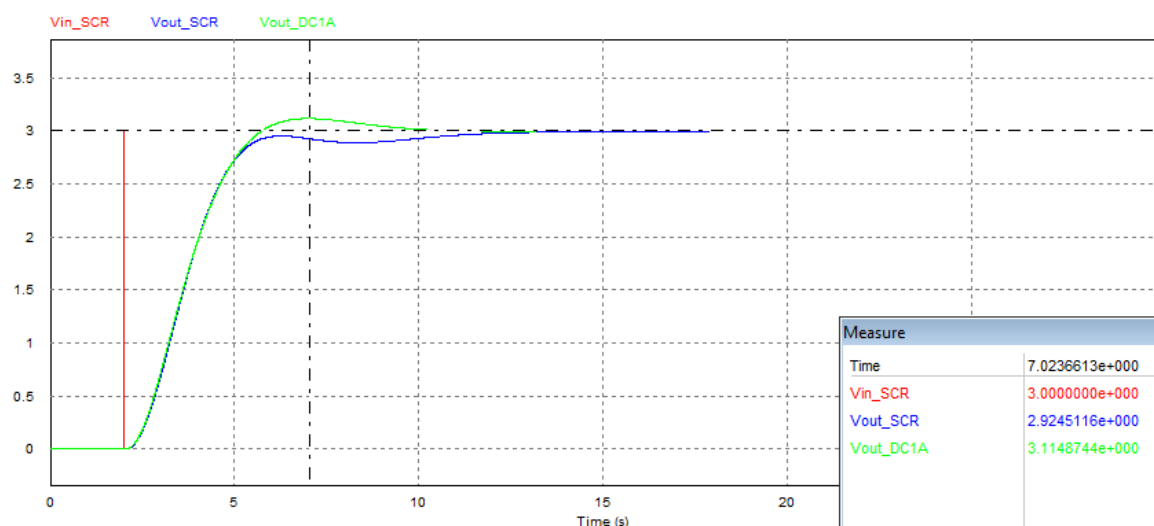



Figura 5.9 - Representação da resposta ao degrau do modelo "DC1A" e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" obtidos pela aplicação "DC1Atuning" (caso 4)

- **Caso 5**

Nesta situação, foram utilizados os parâmetros indicados na tabela 5.9.

Parâmetros do modelo fornecido:	
A	0
B	1
C	1,82
D	1,3
E	0
F	0
G	2,1
H	3,7
I	1

Tabela 5.9 - Valores dos coeficientes da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 5)

A aplicação "DC1Atuning" forneceu a seguinte solução de ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A".

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	30001
Tc	0,7
Tb	10001
Ta	0,0007
Te	0,9939
Ke	1
Tf	3,8576
Kf	1,0363

Tabela 5.10 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação "DC1A"

A solução disponibilizada apresenta apenas pequenas diferenças na resposta em frequência para as curvas de fase do diagrama de Bode.

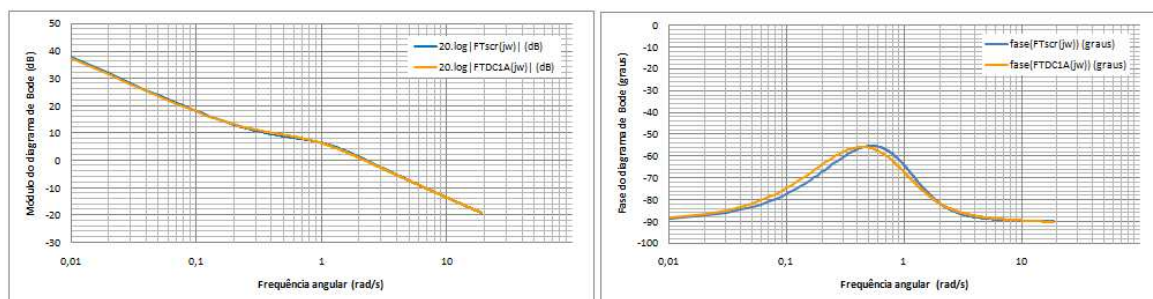



Figura 5.10 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" (caso 5)

No entanto, a resposta à adição de um degrau na tensão de referência dos sistemas de excitação não revelou diferenças de maior.

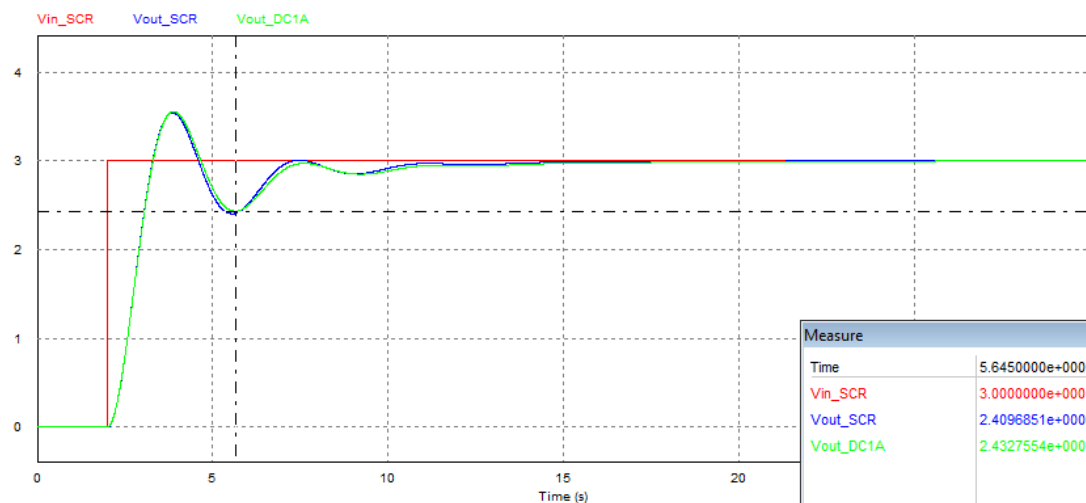



Figura 5.11 - Representação da resposta ao degrau do modelo "DC1A" e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" obtidos pela aplicação "DC1Atuning" (caso 5)

- **Caso 6**

Na tabela 5.11, estão representados os coeficientes da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante.

Parâmetros do modelo fornecido:	
A	0
B	0,7
C	2
D	4
E	0
F	0
G	0,1
H	4
I	1

Tabela 5.11 - Valores dos coeficientes da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 6)

O ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A" a seguir disponibilizado.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	20001
Tc	0,04
Tb	8001
Ta	0,01
Te	0,4691
Ke	1
Tf	3,7065
Kf	3,456

Tabela 5.12 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação "DC1A" (caso 6)

Neste caso, não existem diferenças visíveis na resposta em frequência dos sistemas de excitação.

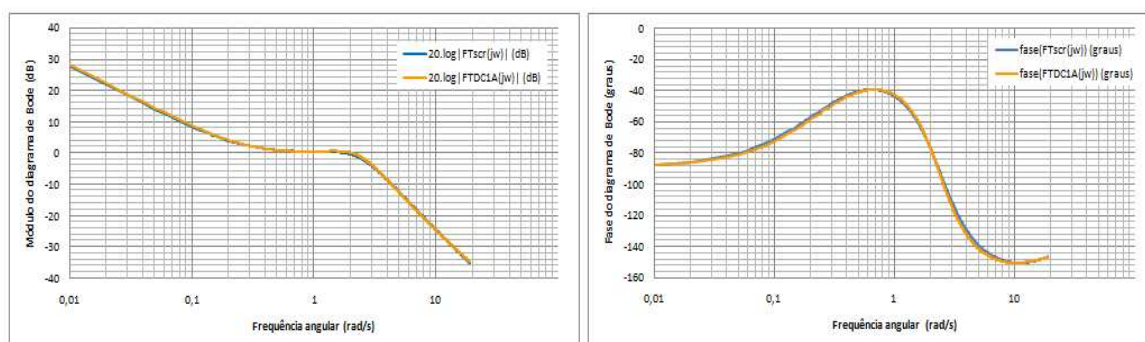



Figura 5.12 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" (caso 6)

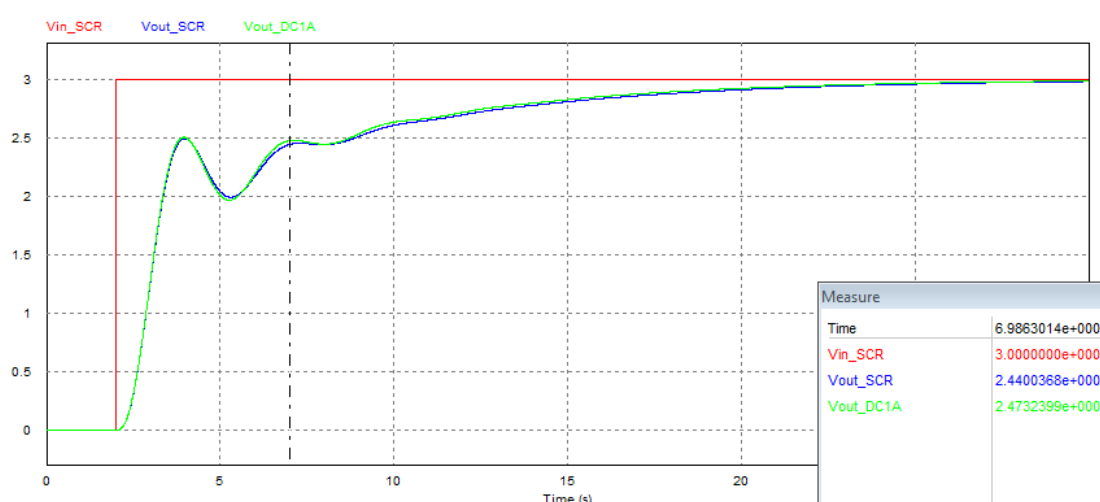



Figura 5.13 - Representação da resposta ao degrau do modelo "DC1A" e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" obtidos pela aplicação "DC1Atuning" (caso 6)

- **Caso 7**

Neste caso de estudo, introduziu-se os coeficientes indicados na tabela 5.13, associado à função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante, na aplicação "DC1Atuning".

Parâmetros do modelo fornecido:	
A	0
B	0,7
C	9
D	4
E	0,1
F	0
G	0,1
H	4
I	1

Tabela 5.13 - Coeficientes da função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante (caso 7)

A aplicação "DC1Atuning" disponibilizou a seguinte solução.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	10
Tc	0,14
Tb	23
Ta	0,028
Te	0,2047
Ke	1
Tf	1,2056
Kf	1,2233

Tabela 5.14 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação "DC1A" (caso 7)

A solução disponibilizada revela limitações de ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A".

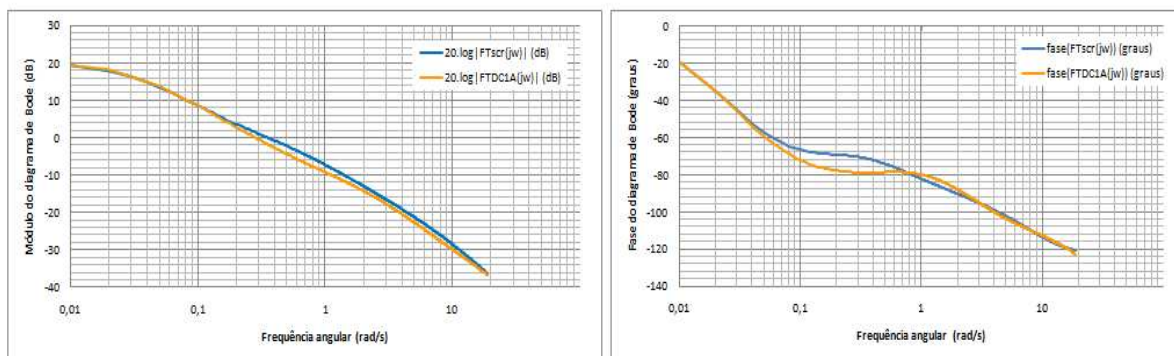



Figura 5.14 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" (caso 7)

É, também, visível na resposta no domínio dos tempos.

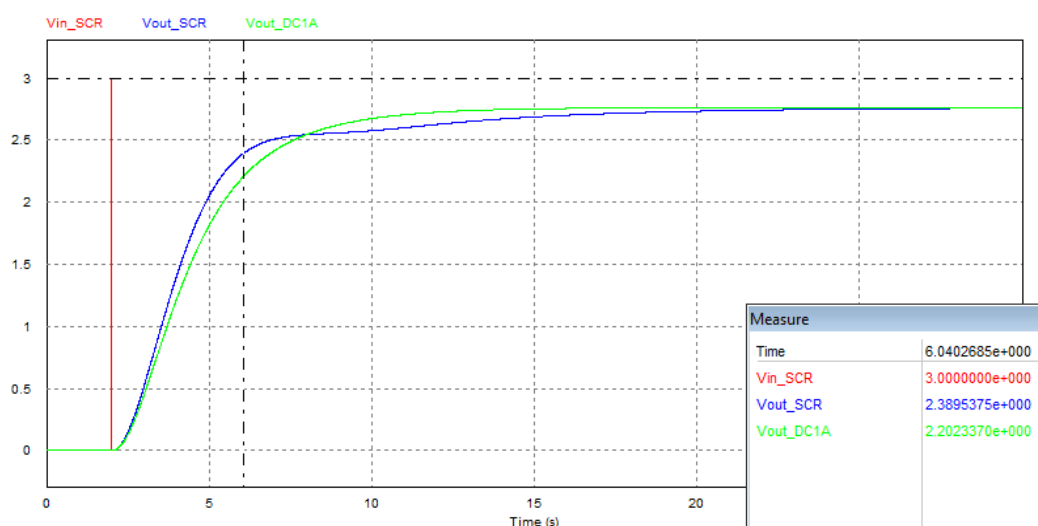



Figura 5.15 - Representação da resposta ao degrau do modelo "DC1A" e modelo fornecido, com a solução de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A" obtidos pela aplicação "DC1Atuning" (caso7)

Isto deve-se à limitação da capacidade de oscilação dos polos e dos zeros na metodologia desenvolvida, especialmente, quando a função de transferência do sistema de excitação fornecido pelo fabricante apresenta, na curva de fase do diagrama de Bode, variações de amplitude que assemelham-se a não linearidades.

5.3 Conclusões

A metodologia apresentada para emular a resposta em frequência de um dado sistema de excitação, através do ajuste dos parâmetros do sistema de excitação típico "DC1A", resultou na criação da aplicação designada por "DC1Atuning".

As soluções de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” fornecidas por esta aplicação, apresentaram resultados, quer na resposta em frequência, quer na resposta no domínio dos tempos, bastante satisfatórios.

No entanto, observam-se limitações à capacidade da metodologia desenvolvida emular a resposta em frequência quando os sistemas de excitação, num intervalo estreito de frequências, apresentem variações significativas da amplitude que poderão ser vistas como quase não linearidades. Tal sucede pelo facto do processo de emulação desenvolvido não conseguir fazer oscilar, de uma forma conveniente, a localização dos seus polos e zeros, pela limitação associada à necessidade de realizar a operação de centramento/truncamento descrita no capítulo 4. Tomando como exemplo o “Caso 7”, a metodologia desenvolvida para a aplicação “DC1Atuning” tenta aproximar uma resposta rectilínea por uma resposta curvilínea, com oscilações, que tende para um comportamento crescentemente rectilíneo (figura 5.14), visto corresponder à solução de ajuste dos parâmetros, cujo somatório de erros se traduz num valor de erro menor.

Relativamente aos valores dos parâmetros propostos pela aplicação “DC1Atuning”, verifica-se que os mesmos poderão não ser fisicamente viáveis, apesar de serem aceitáveis para utilização em modelos de simulação computacionais. No entanto, o reajuste manual da solução de ajuste proposta pela aplicação é possível. Na aplicação serão, também, disponibilizadas as funções para o ajuste individualizado dos parâmetros, seguindo os princípios referidos no capítulo 4.

O sucesso na utilização da aplicação advém, em parte, da correcta definição do critério de paragem, do valor de resolução da frequência no diagrama de bode adoptado, do valor da diferença permitida entre as respostas em frequência dos sistemas de excitação (fornecido e típico) para os valores limite de frequências em análise e o número máximo de iterações definidas na aplicação.

A aplicação “DC1Atuning”, por omissão, tem os critérios de qualidade de emulação já definidos. No entanto, o utilizador deve reanalisar a necessidade do ajuste destes critérios de qualidade em função da solução obtida. A título de exemplo, o reajuste do valor de diferença permitida entre as respostas em frequência dos sistemas de excitação (fornecido e típico) para a gama de frequências em análise poderá resultar na obtenção de uma solução final mais satisfatória, devido a uma diferente capacidade de oscilação dos polos e zeros do modelo típico.

Concretizando, no “Caso 7”, mencionado na secção 5.2, foram utilizados os seguintes critérios de qualidade de emulação na aplicação “DC1Atuning”:

Resolução da frequência no diagrama de bode:	0,0016
Critério de paragem para o valor de erro entre as curvas do diagrama de bode:	0,000001
Definição do valor mínimo de diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para as frequências limite em análise:	0,5
Definição do valor mínimo de diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para as frequências limite em análise:	0,5
Valor do parâmetro "Ke" da excitratiz:	1
Nº máximo de iterações do algoritmo:	10

Tabela 5.15 - Critérios de qualidade de emulação utilizados no "caso 7"

Modificando estes critérios de qualidade de emulação para:

Resolução da frequência no diagrama de bode:	0,0016
Critério de paragem para o valor de erro entre as curvas do diagrama de bode:	0,000001
Definição do valor mínimo de diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para as frequências limite em análise:	0,25
Definição do valor mínimo de diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para as frequências limite em análise:	0,25
Valor do parâmetro "Ke" da excitratiz:	1
Nº máximo de iterações do algoritmo:	20

Tabela 5.16 - Critérios de qualidade de emulação modificados para o sistema de excitação fornecido pelo fabricante no "caso 7"

Foi possível obter a seguinte resposta em frequência.

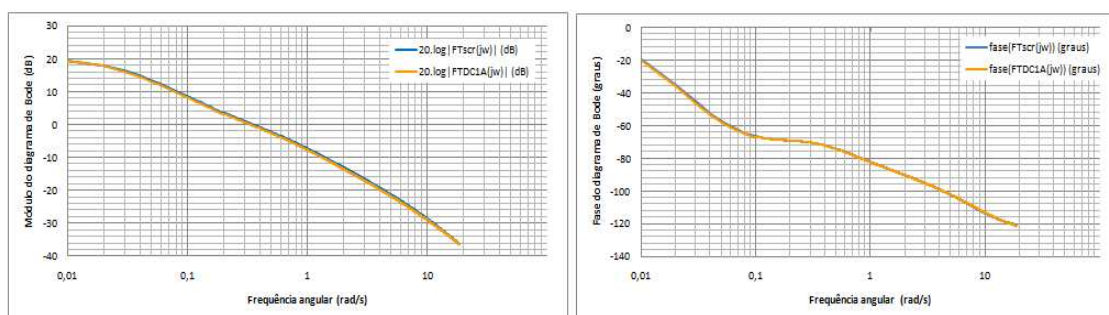



Figura 5.16 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo "DC1A" e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo "DC1A", para o caso 7 (após reajuste dos critérios de qualidade)

A solução de ajuste dos parâmetros do modelo típico “DC1A”, resultante da alteração dos critérios de qualidade, encontra-se indicada na tabela 5.17.

Parâmetros obtidos para o modelo típico "DC1A":	
Ka	10
Tc	0,039
Tb	23
Ta	0,0098
Te	0,0832
Ke	1
Tf	4,1666
Kf	1,4896

Tabela 5.17 - Solução de ajuste dos parâmetros do modelo de sistema de excitação “DC1A” (após reajuste dos critérios de qualidade)

Na figura 5.17, é possível observar o mesmo tipo de resultado, através do ajuste dos critérios de qualidade de emulação, mas, agora, no “Caso 4”.

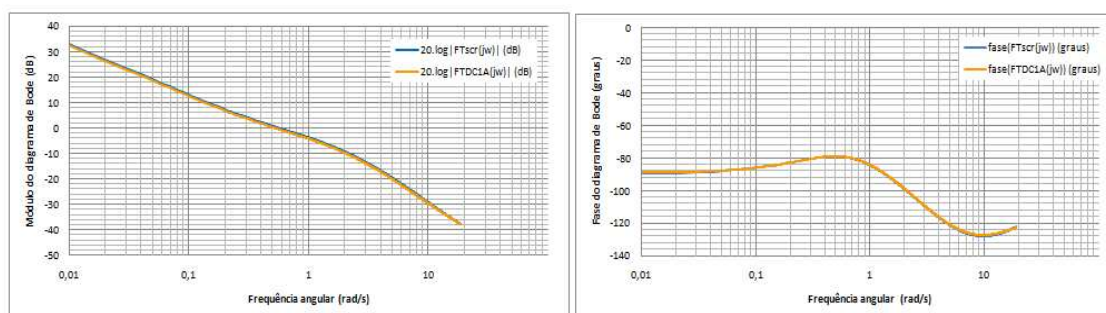



Figura 5.17 - Representação do diagrama de Bode das funções de transferência do modelo “DC1A” e do modelo fornecido, com a solução final de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A”, para o caso 4

Salienta-se, no entanto, que nem todos os sistemas de excitação poderão ver a eficiência de emulação melhorada apenas pelo ajuste dos critérios de qualidade.

Neste caso, fica patente a limitação da metodologia desenvolvida, ao não conseguir emular a resposta em frequência com o pormenor pretendido.

No que respeita à escolha do intervalo de frequências em análise, verifica-se que foi adequada, tal como previsto pelo IEEE. Nos sistemas de excitação emulados denota-se que se o comportamento das respostas em frequência for coincidente entre os limites de frequência analisados, a resposta ao aumento de um degrau na tensão de referência do sistema de controlo de excitação típico (emulado), também, o será.

Nesta avaliação dos resultados não foram realizados comentários quanto à estabilidade relativa dos sistemas de excitação, porque o objectivo principal deste trabalho é a emulação

da resposta em frequência de um sistema de excitação fornecido pelo fabricante. Mas, tal análise pode ser feita através da avaliação dos valores dos parâmetros propostos na solução de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A”, comparando com os valores propostos pelas técnicas de melhoramento do desempenho descritas no capítulo 3. Adicionalmente, também, utilizando a macro que permite calcular as margens de fase e ganho dos sistemas de excitação, na aplicação “DC1Atunig”, é possível aferir alguns dos índices de desempenho necessários ao estudo da estabilidade relativa destes sistemas de excitação.

Capítulo 6

Conclusões

A aplicação “DC1Atuning” resulta do estudo comportamental do ajuste dos parâmetros do modelo típico “DC1A”. Esta aplicação não pretende fornecer uma solução proveniente do cálculo numérico, mas sim uma aproximação, que resulta de uma metodologia de ajuste de parâmetros, associada às preocupações inerentes à programação não linear de fornecer uma solução óptima.

Os resultados obtidos para os casos de teste da aplicação, apresentados no capítulo 5, são bastante satisfatórios, quer na resposta em frequência, quer na resposta temporal ao aumento de um degrau na tensão de referência do sistema de excitação, o que demonstra a narratividade da metodologia desenvolvida.

A solução de ajuste dos parâmetros do modelo “DC1A” obtida através da utilização da macro “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir da fase do diagrama de Bode” apresentou sempre melhores resultados finais quanto ao erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase. Tal justifica-se pela maior facilidade em obter um valor menor de erro quadrático médio relativo quando se emula um sistema de excitação através da curva do módulo do diagrama de Bode, devido à menor complexidade das respectivas curvas (tempo de execução mais rápido). Para se obter uma solução equivalente através da macro “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir do módulo do diagrama de Bode” é necessário diminuir significativamente o valor do critério de paragem (aumentar precisão).

O tempo de execução da aplicação varia mediante a complexidade do sistema de excitação a emular, o número máximo de iterações definidas pelo utilizador, o nível de precisão da emulação desejada (definição dos critérios de paragem e das diferenças mínimas para as frequências limite em análise) e a velocidade do processador onde irá correr a aplicação. Assim sendo, para as emulações apresentadas nesta tese, o tempo de execução da aplicação variou entre 30 e 90 minutos para um processador com frequência de relógio de 2,53Ghz.

No entanto, existe margem para melhorar ou refinar, não só a metodologia desenvolvida, como também as soluções técnicas adoptadas na respectiva implementação, uma vez que, pelas limitações temporais associadas à elaboração desta tese não foi possível aprofundar mais. Assim sendo, vislumbra-se a necessidade de desenvolver futuros trabalhos nesta área, os quais poderão, caso o assim pretendam, desenvolver e/ou aprofundar a abordagem adoptada nesta tese (por exemplo: aumentar a rapidez de execução da aplicação “DC1Atuning”).

Referências

[1] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Std. 421.5-2005, 2006, E-ISBN: 0-7381-4787-7, ISBN: 0-7381-4786-9.

[2] Prabha Kundur, "Power System Stability and Control", ISBN 0-07-035958-X, McGraw-Hill, 1993.

[3] IEEE Guide of Identification, Testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control System, IEEE Standard 421.2-1990;

[4] Koessler, R.J., "Techniques for Tuning Excitation System Parameters," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 3, pp. 785-791 (1988);

[5] IEEE COMMITTEE REPORT, "A Feasibility Study of On-Line Excitation System Parameter Estimation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. *3,* August 1998;

[6] J-C Wang, et. al, "Identification of excitation system models based on On-line digital measurements," *IEEE " Transactions* on *Power Systems,* vol. 10, no. 3, August 1995;

[7] C. M. Liaw, T. S. Liu, A. H. Liu, Y. T. Chen, and C. J. Lin, "Parameter Estimation of Excitation Systems from Sampled Data", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, VOL. *31,* NO. 5, MAY 1992.

[8] Helena Vasconcelos, Tese de Doutoramento "Avaliação e Controlo de Segurança de Redes Interligadas com Grande Penetração Eólica com base em Métodos de Aprendizagem Automática, ano 2007.

[9] José Pedro Sucena Paiva, "Redes de energia eléctrica: uma análise sistémica", ISBN 972-8469-34-9, IST Press, 2005.

[10] Antonio Gómez Expósito, "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica", ISBN 84-481-3592-X, McGraw-Hill,2002.

[11] Helena Vasconcelos, Apontamentos da unidade curricular DESI do 5º ano do MIEEC da área de energia, ano lectivo 2010/11.

[12] Salgado, “CONTROL SYSTEM DESIGN”, Prentice Hall, 2000.

[13] Chi-Tsong Chen, “Analog and Digital Control System Design: Transfer-Function, State-space, and Algebraic Methods”, ISBN 9780195310467,Prentice Hall, 2006.

[14] IEEE Committee Report, “Excitation System Dynamic Characteristcs” IEEE Trans., Vol. PAS-92,pp.66-75, January/February 1973;

[15] IEEE Recommend Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Standard 421.5 – 1992;

[16] IEEE COMMITTEE REPORT, "Excitation System Dynamic Characteristics", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vo1, PAS-92, No. 1, January/February 1973, pp. 64-75.

Anexo

Manual de Utilização da aplicação “DC1Atuning”

A aplicação “DC1Atuning” disponibiliza macros de cálculo do ajuste dos parâmetros para o modelo de sistema de excitação típico “DC1A”, as quais permitem emular a resposta em frequência de outros sistemas de excitação.
A aplicação “DC1Atuning” foi implementada em EXCEL e encontra-se subdivida em quatro páginas:

- “Procura...”;
- “AVR + excitratiz fornecido”;
- “Modelo típico DC1A”;
- “Cálculo dos parâmetros p DC1A”.

Página “Procura...”:

A página *“Procura...”* corresponde à folha de rosto da aplicação, onde, à distância de um click, se pode dar início à utilização das macros de cálculo do ajuste dos parâmetros para o modelo típico “DC1A”.

A hiperligação *“Inserir parâmetros do regulador de tensão automático e excitratiz fornecido”* permite-nos saltar para a página *“AVR + excitratiz fornecido”*, na qual se pode inserir e/ou alterar os parâmetros do modelo fornecido pelo fabricante, bem como definir os critérios de qualidade utilizados no algoritmo de cálculo do ajuste dos parâmetros para o modelo típico “DC1A”.

A hiperligação *“Cálculo dos parâmetros para o modelo típico de sistema de excitação "DC1A””* permite-nos saltar para a página *“Cálculo dos parâmetros DC1A”,* na qual se pode dar início ao cálculo dos parâmetros do modelo típico “DC1A”.

A hiperligação *"Resultado do ajuste dos parâmetros para o modelo típico "DC1A""* permite-nos saltar para a página *"Modelo típico DC1A"* onde, após cálculo dos mesmos, se podem obter os parâmetros do modelo típico "DC1A".

Página "AVR + excitratiz fornecido":

Na página *"AVR + excitratiz fornecido"* poder-se-á inserir os parâmetros do modelo fornecido pelo fabricante ou, em alternativa, a função de transferência equivalente do sistema de excitação pretendido, bem como os critérios de qualidade utilizados no algoritmo de cálculo do ajuste dos parâmetros para o modelo típico "DC1A".

Nesta página, dependendo da escolha do utilizador pela variante da aplicação pretendida, encontram-se pré-definidos os parâmetros Ta1, Ta11, Ta2, Ta22 e Tee do modelo fornecido pelo fabricante ou os coeficientes a..i da função de transferência equivalente. Não obstante este facto, o utilizador pode alterar os parâmetros em função da simulação do sistema de excitação pretendido.

Os parâmetros e os coeficientes acima mencionados foram retirados ou calculados de um caso de teste e correspondem a um sistema de excitação composto por um regulador automático de tensão e respectiva excitratiz, cuja configuração apresenta diferenças face ao modelo típico "DC1A".

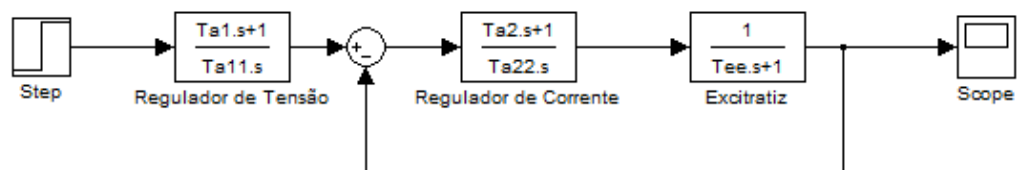



Figura 1 – Diagrama de Blocos do sistema de excitação fornecido pelo fabricante

Na página *"AVR + excitratiz fornecido"* é possível visualizar o diagrama de blocos do modelo fornecido pelo fabricante (fig. 1) ou, em alternativa, a localização de cada um dos coeficientes na respectiva função de transferência equivalente.

De acordo com o explanado anteriormente, nesta página são também definidos os critérios de qualidade para o cálculo dos parâmetros para o modelo típico "DC1A".

Os critérios de qualidade necessários ao cálculo dos parâmetros do modelo típico são os seguintes:

- "Resolução da frequência no diagrama de Bode";
- "Critério de paragem para o valor de erro entre as curvas do diagrama de Bode";
- "Definição do valor inicial de diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para as frequências limite em análise";
- "Definição do valor inicial de diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para as frequências limite em análise";
- "Inserir o valor do parâmetro Ke da excitratiz";
- "Número máximo de iterações do algoritmo".

A *"Resolução da frequência no diagrama de Bode"* corresponde ao incremento mínimo da frequência angular entre pontos das curvas do diagrama de Bode do modelo fornecido e do modelo típico entre os valores limite de, aproximadamente, 0 e 3Hz, ou seja, a frequência de amostragem. Este valor é, por omissão, "0,0016Hz", independentemente da escolha da macro a utilizar no cálculo do ajuste dos parâmetros (módulo ou fase do diagrama de Bode).

O *"Critério de paragem para o valor de erro entre as curvas do diagrama de Bode"* corresponde à diferença mínima entre as curvas do diagrama de Bode do modelo fornecido e do modelo típico entre os valores limite de, aproximadamente, 0 e 3Hz. Este valor é, por omissão, "0,00001", independentemente da escolha da macro a utilizar no cálculo do ajuste dos parâmetros (módulo ou fase do diagrama de Bode).

A *"Definição do valor inicial de diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para as frequências limite em análise"* corresponde ao valor da diferença mínima entre as curvas do módulo do diagrama de Bode utilizada pelo algoritmo de ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A", nos pontos do gráfico com frequência angular de, aproximadamente, "0" e "18,85 rad/s" (0 e 3 Hz), para que, através do ajuste do valor dos parâmetros "Ka" e "Tc", respectivamente, o critério acima mencionado seja validado. O valor é, por omissão, "0,5 dB".

A *"Definição do valor inicial de diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para as frequências limite em análise"* corresponde ao valor da diferença mínima entre as curvas de fase do diagrama de Bode utilizada pelo algoritmo de ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A", nos pontos do gráfico com frequência angular de, aproximadamente, "0" e "18,85 rad/s" (0 e 3 Hz), para que, através do ajuste do valor dos parâmetros "Tb" e "Ta", respectivamente, o critério acima mencionado seja validado. O valor é, por omissão, "0,25°".

O *"Inserir o valor do parâmetro Ke da excitratiz"* corresponde ao valor do ganho inverso a ser introduzido no bloco da excitratiz. Este valor está relacionado com tipo de excitratiz existente na solução do sistema de excitação, auto-excitado ou com excitação separada, sendo que o algoritmo por omissão utiliza o valor "1" que é habitualmente utilizado em excitatrizes com excitação separada.

O *"Número máximo de iterações do algoritmo"* corresponde, tal como o nome indica, ao número máximo de vezes que o processo de cálculo dos parâmetros do modelo típico "DC1A" é repetido.

Página "Modelo típico DC1A"

Na página "Modelo típico DC1A" são apresentados os resultados do cálculo do ajuste dos parâmetros do sistema de excitação típico "DC1A", tal como o respectivo diagrama de blocos representativo do sistema de excitação (fig. 2).

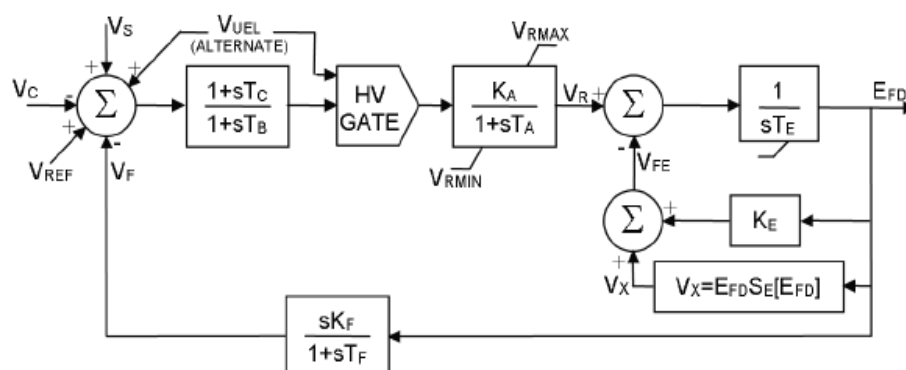



Figura 2 - Diagrama de Blocos do sistema de excitação típico "DC1A".

Página "Cálculo dos parâmetros DC1A"

Na página *"Cálculo dos parâmetros DC1A"* estão acessíveis as macros que permitem calcular o ajuste dos parâmetros do modelo típico "DC1A" a partir das curvas do módulo ou da fase dos diagramas de Bode.

Adicionalmente, é possível calcular as margens de fase e de ganho dos sistemas de excitação tal, como, visualizar as tabelas onde são realizados os cálculos necessários para que as macros determinem o ajuste dos parâmetros do modelo típico com um determinado erro quadrático médio relativo (também acessível).

Nesta página encontram-se, também, os gráficos do módulo e da fase do diagrama de Bode onde estão representadas as respectivas curvas do modelo fornecido pelo fabricante e do modelo típico “DC1A”.

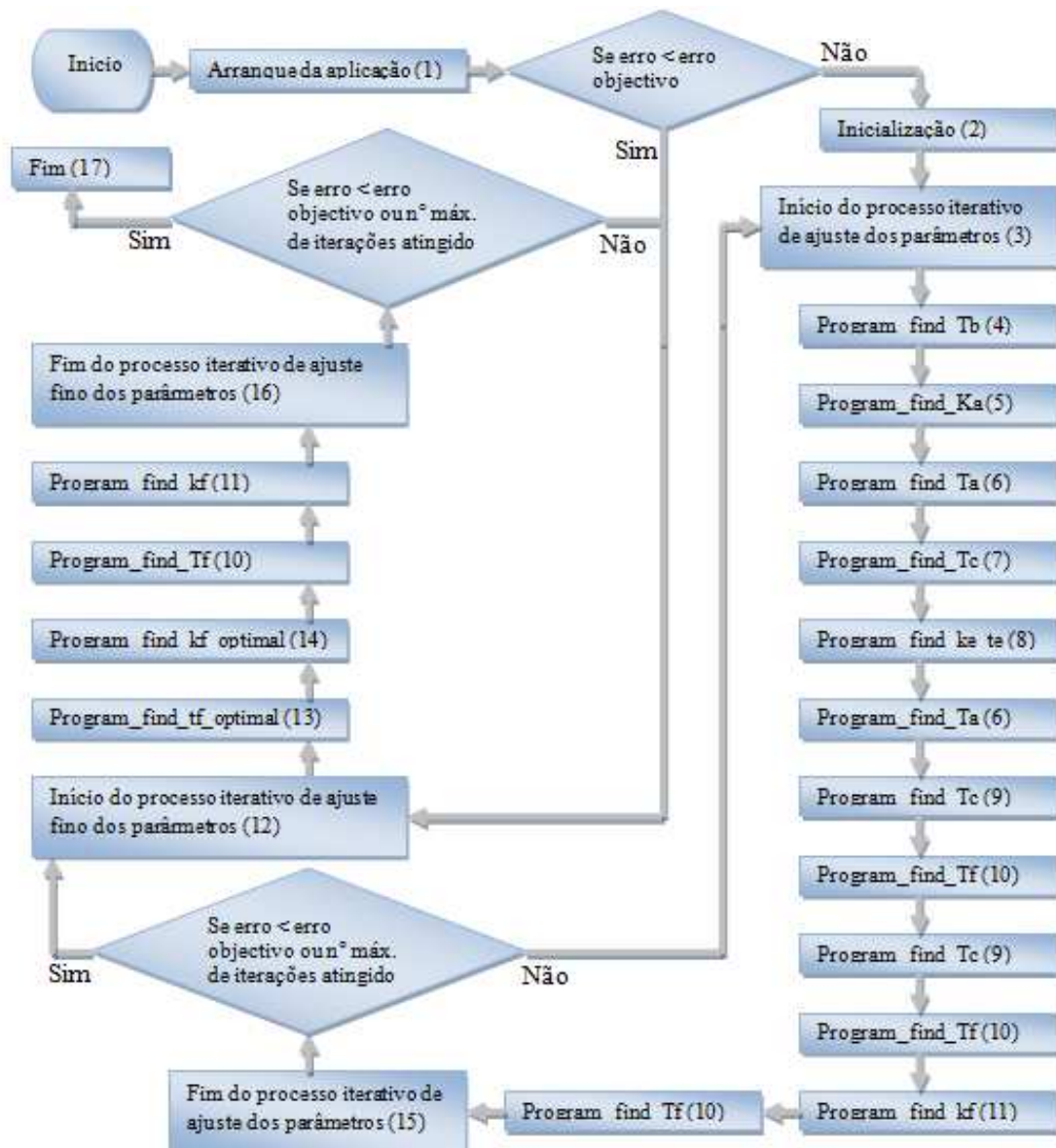
O algoritmo de cálculo dos parâmetros do sistema de excitação do modelo típico “DC1A” consiste em:

1. Escolha da macro a utilizar na determinação do valor dos parâmetros do modelo “DC1A”, “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" apartir do módulo do diagrama de Bode” ou “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" apartir do módulo do diagrama de Bode”, sendo posteriormente inicializados todos os parâmetros do modelo típico DC1A com valor “1” à excepção do parâmetro “Ke”, o qual é definido pelo utilizador, caso o erro quadrático médio relativo associado à macro escolhida seja superior ao valor definido nos critérios de qualidade da aplicação “DC1Atuning”.
2. Executar a função “Program_find_Tb”. Através desta função, o parâmetro “Tb” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para a frequência angular de, aproximadamente, “0”. Se a diferença entre as duas curvas para a frequência angular de, aproximadamente, “0”, for inferior a 0.25º (valor por omissão), o valor do parâmetro “Tb” está encontrado.
3. Executar a função “Program_find_ka”. Através desta função, o parâmetro “Ka” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para a frequência angular de, aproximadamente, “0”. Se a diferença entre as duas curvas para a frequência angular de, aproximadamente, “0” for inferior a 0.5dB (valor por omissão), o valor do parâmetro “Ka” está encontrado.
4. Executar a função “Program_find_Ta”. Através desta função, o parâmetro “Ta” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para a frequência angular de, aproximadamente, "18,85". Se a diferença entre as duas curvas para a frequência angular de, aproximadamente, "18,85" for inferior a 0.25º (valor por omissão), o valor do parâmetro “Ta” está encontrado.
5. Executar a função “Program_find_Tc”. Através desta função, o parâmetro “Tc” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para a frequência angular de, aproximadamente, "18,85 rad/s". Se a diferença entre as duas curvas para a frequência angular de, aproximadamente, “18,85 rad/s" for inferior a 0.5dB (valor por omissão), o valor do parâmetro “Tc” está encontrado.

6. Executar a função “Program_find_ke_te”. Através desta função, o parâmetro Te é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando o erro quadrático relativo associado à diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para a frequência angular entre, aproximadamente, “0” e "18,85” rad/s. Se a diferença entre as duas curvas for inferior a 0.00001 (valor por omissão), o valor do parâmetro Te está encontrado.
7. Após ter executado a função “Program_find_ke_te”, o algoritmo volta a executar as funções “Program_find_Ta” e “Program_find_Tc”, de forma a garantir que as curvas do diagrama de Bode estão ajustadas para a frequência angular de “18,85 rad/s”.
8. Executar a função “Program_find_Tf”. Através desta função, o parâmetro “Tf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando o erro quadrático relativo associado à diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para a frequência angular entre, aproximadamente, “0” e "18,85". Se a diferença entre as duas curvas for inferior a 0.00001 (valor por omissão), o valor do parâmetro “Tf” está encontrado.
9. Posteriormente, é executada a função “Program_find_Tc”, para que a curva do módulo do diagrama de Bode não deixe de convergir para a frequência angular de “18,85 rad/s”. De seguida, é, novamente, executada a função “Program_find_Tf”.
10. Executar a função “Program_find_kf”. Através desta função, o parâmetro kf é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando o erro quadrático relativo associado à diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para a frequência angular entre, aproximadamente, “0” e "18,85". Se a diferença entre as duas curvas for inferior a 0.00001 (valor por omissão), o valor do parâmetro “kf” está encontrado.
11. Após a execução da função “Program_find_kf”, a função “Program_find_Tf” é executada novamente.
12. As etapas de 1. a 11. são continuamente repetidas até que o valor do critério de paragem para o erro quadrático relativo da diferença de emulação seja atingido ou o número máximo de iterações seja ultrapassado.
13. Dependendo da escolha da macro “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir do módulo do diagrama de Bode” ou da macro “Iniciar o cálculo dos pârametros para o modelo típico "DC1A" a partir da fase do diagrama de Bode”, o ajuste dos parâmetros do modelo típico “DC1A” é realizado a partir das curvas do módulo ou da fase dos diagramas de Bode, o algoritmo executa ou a função “initialize_optimal” ou a função “initialize_optimal_fase”, respectivamente. A função “initialize_optimal” ou a função “initialize_optimal_fase” consiste na execução contínua das funções “Program_find_Tf_optimal”, “Program_find_Kf_optimal”, “Program_find_Tf” e “Program_find_Kf”, até que o critério de paragem, o erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase, respectivamente, seja atingido ou número máximo de iterações seja ultrapassado.

Através da função “Program_find_Tf_optimal”, o parâmetro “Tf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para a frequência angular de, aproximadamente, “0”. Se a diferença entre as duas curvas para a frequência angular aproximadamente igual a “0” for inferior a 0.25º (valor por omissão), o valor do parâmetro “Tf” está encontrado.
Através da função “Program_find_kf_optimal”, o parâmetro “kf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de módulo do diagrama de Bode para a frequência angular de, aproximadamente, “0”. Se a diferença entre as duas curvas para a frequência angular de, aproximadamente, “0” for inferior a 0.5dB (valor por omissão), o valor do parâmetro “kf” está encontrado.

Nota: As macros foram desenvolvidas no Microsoft Office Excel em língua Portuguesa.

Fluxograma da aplicação “DC1Atuning”

Legenda:

(1) Arranque da aplicação “DC1Atuning”:

- Introdução dos parâmetros ou coeficientes do modelo ou função de transferência fornecido pelo fabricante, consoante a versão da aplicação escolhida;
- Definição dos critérios de qualidade da emulação;
- Escolha da macro “Iniciar o cálculo dos parâmetros para o modelo típico "DC1A" a partir do módulo do diagrama de Bode” ou da macro “Iniciar o cálculo dos parâmetros para o modelo típico "DC1A" a partir da fase do diagrama de Bode” para iniciar a execução da aplicação.

(2) Inicialização:

- Verifica se o valor de erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase, dependendo da macro escolhida, é superior ao valor definido na aplicação, se sim continua se não sai da aplicação;
- Inicialização dos parâmetros "Ka", "Ta", "Tb", "Tc", "Te", "Tf" e "kf" com o valor "0". O parâmetro "Ke" assume o valor definido pelo utilizador.

(3) (15) Inicio/Fim do processo iterativo de ajuste dos parâmetros:

- O processo iterativo é repetido até que o valor de erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase, dependendo da macro escolhida, seja inferior ao valor definido na aplicação ou até que o número máximo de iterações definido na aplicação seja atingido;
- O processo iterativo irá disponibilizar a solução de ajuste dos parâmetros que apresentou o menor valor de erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase.

(4) Program_find_Tb:

- O parâmetro Tb é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para w aproximadamente igual a "0". Se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "0", for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro "Tb" está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "0", for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa "Program_find_Tb", o parâmetro "Tb" irá manter o valor actual.

(5) Program_find_ka:

- O parâmetro "Ka" é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para w aproximadamente igual "0". Se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "0", for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro "Ka" está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "0", for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa "Program_find_ka", o parâmetro "Ka" irá manter o valor actual.

(6) Program_find_Ta:

- O parâmetro "Ta" é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para w aproximadamente igual a "18,85". Se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "18,85", for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro "Ta" está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "18,85", for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa "Program_find_Ta", o parâmetro "Ta" irá manter o valor actual.

(7) Program_find_Tc:

- O parâmetro “Tc” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para w aproximadamente igual a "18,85". Se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "18,85", for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro “Tc” está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "18,85", for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_Tc”, o parâmetro “Tc” irá manter o valor actual.

(8) Program_find_ke_te:

- O parâmetro Te é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando o erro quadrático médio relativo associado à diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para w entre "0" e "18,85". Se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor do critério de paragem definido na aplicação, o valor do parâmetro “Te” está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_ke_te”, o parâmetro “Te” irá manter o valor actual.

(9) Program_find_Tc:

- O parâmetro “Tc” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas do módulo do diagrama de Bode para w aproximadamente igual a "18,85". Se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "18,85", for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro “Tc” está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "18,85", for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_Tc”, o parâmetro “Ta” irá manter o valor actual.

(10) Program_find_Tf:

- O parâmetro “Tf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando o somatório dos erros absolutos relativos associado à diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para w entre "0" e "18,85". Se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor do critério de paragem definido na aplicação, o valor do parâmetro “Tf” está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_Tf”, o parâmetro “Tf” irá manter o valor actual.

(11) Program_find_kf:

- O parâmetro “kf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando o somatório dos erros absolutos relativos associado à diferença entre as

curvas de fase do diagrama de Bode para w entre "0" e "18,85". Se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor do critério de paragem definido na aplicação, o valor do parâmetro “kf” está encontrado.

- No entanto, se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_kf”, o parâmetro “Kf” irá manter o valor actual.

(12) (16) Inicio/Fim do processo iterativo de ajuste fino dos parâmetros:

- O processo iterativo é repetido até que o valor de erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase, dependendo da macro escolhida, seja inferior ao valor definido na aplicação ou até que o número máximo de iterações definido na aplicação seja atingido;
- O processo iterativo irá disponibilizar a solução de ajuste dos parâmetros com menor valor de erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase.

(13) Program_find_Tf_optimal:

- O parâmetro “Tf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de fase do diagrama de Bode para w aproximadamente igual a "0". Se a diferença entre as duas curvas, para w aproximadamente igual a "0", for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro “Tf” está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_Tf_optimal”, o parâmetro “Tf” irá manter o valor actual.

(14) Program_find_kf_optimal:

- O parâmetro “kf” é determinado em função do resultado do valor inserido, calculando a diferença entre as curvas de módulo do diagrama de Bode para w aproximadamente igual a "0". Se a diferença entre as duas curvas para w aproximadamente igual a "0" for inferior ao valor definido na aplicação, o valor do parâmetro “Kf” está encontrado.
- No entanto, se a diferença entre as duas curvas for inferior ao valor definido na aplicação aquando do início do programa “Program_find_Kf_optimal”, o parâmetro “Kf” irá manter o valor actual.

(17) Fim:

- Confirma que a solução de ajuste dos parâmetros do modelo típico “DC1A” fornecida pela aplicação corresponde à solução resultante de ambos os processos iterativos (standard e fino) que apresenta o menor valor de erro quadrático médio relativo do módulo ou da fase, dependendo da macro escolhida.